
Entwicklung der Zementqualität für den Tunnelbau

DEVELOPMENT OF CEMENT QUALITY FOR TUNNEL CONSTRUCTION

DIPL.-ING. JOSEF KITZWEGER, PRÜFANSTALT MANNERSDORF, PERLMOOSER ZEMENTWERKE AG, MANNERSDORF A. L.

Die Entwicklung der Qualität von Perlmooser Zement für Tunnelbau, insbesondere für Spritzbeton, wird anhand der bisher durchgeführten Tunnelprojekte - beginnend mit dem Arlbergtunnel bis zur Gegenwart - dargestellt.

Dabei stehen die physikalischen Eigenschaften der Zemente (z. B. Feinheit, Festigkeitsentwicklung, Anfangsfestigkeit, Erstarrungszeiten, Sulfatbeständigkeit), die Art der Zementsorte sowie die Gleichmäßigkeit der gelieferten Zemente im Vordergrund.

Parallel zur Qualitätsentwicklung des Zementes wird auch auf die damit zusammenhängende Entwicklung der Erstarrungsbeschleuniger eingegangen.

Aus der Analyse der bisherigen Qualitätsentwicklung werden schließlich Vorstellungen für die künftigen Anforderungen an Zement für Tunnelbauten abgeleitet.

The development of cement quality for tunnel construction according to the NATM with special respect to shotcreting is shown and examples for various projects, starting with Arlberg-tunnel to present projects are described.

The physical properties of cement (e. g. fineness, strength development, early hardening, setting time, sulfat resistance), the kind of cement and the homogeneity of the cements used are the main criteria. Simultaneous to the quality of cement, the performance of accelerators will be discussed.

Based on the overview of the quality-development up to now, the requirements to cement for future tunneling construction work are noted.

1. Einleitung

Die Anwendung des Spritzbetons hat ausgehend von den Stollenbauten im öffentlichen Kraftwerksbau Anfang der fünfziger Jahre in hohem Maße zugenommen. Dabei hat die NÖT nicht nur österreichweit, sondern auch international eine hohe Bedeutung erlangt.

Als Ausdruck für die rasante Zunahme des Tunnelbaus möge ein Artikel einer steirischen Tageszeitung aus dem Jahre 1980 mit dem Titel "Das Land der Maulwürfe", dienen. Darin heißt es weiter "Bis 1970 gab es in der Steiermark nur einen einzigen bescheidenen Kilometer Straßentunnel. Ende der Achtzigerjahre werden es schon 50 km sein. Nach dem Endausbau unseres

Straßennetzes in den Neunziger Jahren werden dann fast 100 km Untergrundstrecke zur Verfügung stehen".

Durch die rasche Zunahme der Tunnelbauten in den Siebziger und Achtziger Jahren und die Miteinbeziehung und Verwertung der laufend gewonnenen Erfahrungen ist heute die zielsichere Herstellung von Qualitätsbeton auf einem sehr hohen Entwicklungsstand angelangt. Welche Rolle dabei der Zement gespielt hat, wird im folgenden näher beleuchtet. Zur besseren Verständlichkeit der vom Zementerzeuger zu berücksichtigenden Randbedingungen, wird auf die einzelnen Werke unserer Firma getrennt eingegangen, wodurch sich eine Unterteilung der Entwicklung von Zement für Tunnelbauten in West-, Süd- und Ostösterreich ergibt.

Zuerst möchte ich jedoch noch kurz auf die wesentlichsten Eigenschaften, die an Beton für Tunnelbauten, d.h. Spritzbeton und Innenschalenbeton, gestellt werden, eingehen.

Die Anforderungen an den Spritzbeton im Einsatz bei der "NÖT" sind vielfältig. Er muß eine möglichst hohe Frühfestigkeit und eine ausreichende Endfestigkeit aufweisen, gut am Untergrund haften, geringen Rückprall haben und möglichst dicht sein. Unter Beachtung einer ausgewogenen Festigkeitsentwicklung soll der hierfür eingesetzte Zement vor allem möglichst hohe Feinheit im Hinblick auf eine Verringerung des Rückpralls aufweisen.

Nach Fertigstellung der Vortriebsarbeiten werden üblicherweise Innenschalen aus wasserundurchlässigem Beton eingebaut. Vom Innenschalenbeton wird neben den üblichen Forderungen, wie gute Pumpfähigkeit, Wasserundurchlässigkeit, Dauerhaftigkeit auch Rissesicherheit verlangt. Während für die erstgenannten Eigenschaften hauptsächlich die Rezeptur und Verarbeitung des Betons ausschlaggebend ist, ist für die Sicherheit gegen Rißbildung neben der Bauwerksausbildung vor allem die Hydratationswärme des Betons maßgebend. Die Wärmeentwicklung im Beton ist vor allem von der Temperatur des Frischbetons und von der Hydratationswärme des Zements abhängig.

Was den Zement betrifft, so ist es aus logistischen Gründen bei Tunnelbauten üblich, den gelieferten Zement sowohl für die Spritzbetonarbeiten als auch für die Herstellung der Innenschale einzusetzen, wobei in manchen Fällen noch Flugasche oder Mikrosilika, direkt an der Baustelle, zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit

und Absenkung der Hydratationswärmeentwicklung zugesetzt wird.

2. Entwicklung der Zementqualität

2.1 Westösterreich

Einen Meilenstein für die Entwicklung des Zements für Tunnelbau in Westösterreich stellte die Errichtung des Arlbergtunnels, Ende der Siebziger/Anfang Achtziger Jahre, dar. Der verwendete Zement, ein PZ 275 (H) (der Klammersausdruck (H) bedeutet, daß Hochofenschlacke als Zumahlstoff enthalten ist), wurde sowohl für Spritzbeton, als auch für die Herstellung der Innenschale eingesetzt. Während beim Spritzbeton keine Schwierigkeiten auftraten - ja vielmehr sich die Maßnahme des Flugaschezusatzes in Verbindung mit einem Zement gleichmäßiger Qualität positiv auswirkte, traten beim Ringbeton nach der Fertigstellung verstärkt Risse auf.

Als Ursache für die Rißbildung kann eine Mitwirkung des Zements nicht ausgeschlossen werden, zumal das Niveau der 1-Tagesfestigkeiten nach ÖN B 3310 damals bei 15 N/mm² und darüber lag (Bild 2 - Jahre 1978 bis 1980).

Erklärbar ist diese Tatsache durch die bei der Erhärtung des Zementes freiwerdenden Wärmemenge, welche zu einem Temperaturanstieg im Frischbeton führt und schließlich bei der Abkühlung des Betons im erhärteten Zustand Risse verursacht. Da die Höhe der entstehenden Wärme durch die Reaktion der Klinkerminerale des Zements mit Wasser im wesentlichen vorgegeben ist, bleibt aus der Sicht des Zements nur die Möglichkeit das Entstehen der Wärme möglichst gleichmäßig zu „verteilen“, d.h. im konkreten Fall ein ausgewogenes Verhältnis zwischen 1-Tages- und 28-Tages-Festigkeitswerten anzustreben.

Hohe Frühfestigkeiten führen also neben dem Vorteil einer kürzeren Ausschalzeit auch zu einer höheren Wärmeentwicklung in der Anfangsphase der Erhärtung. Der noch verformbare Beton dehnt sich in dieser Phase, kann aber besonders bei rascher Abkühlung im erhärteten Zustand, auf Grund der Bewegungsbehinderungen in und quer zur Tunnelachse, die entstehenden Zugspannungen durch Relaxation nicht mehr vollständig abbauen und reißt daher.

Unter besonderer Berücksichtigung der beim Arlbergtunnel gewonnenen Erfahrungen, d.h.

einerseits die positiven Erfahrungen des Flugaschezusatzes bzw. andererseits die besondere Beachtung einer ausgewogenen Festigkeitsentwicklung in Zusammenhang mit einer begrenzten Hydratationswärmeentwicklung führten, speziell für den Tunnelbau, zur Entwicklung eines flugaschehaltigen Zementes. Als optimal stellte sich ein Flugaschegehalt im Zement von 20 % heraus.

Damit stand ein "Grundbindemittel" mit besonderer Gleichmäßigkeit zur Verfügung, welches gleichzeitig durch geringe Flugaschezusätze an der Baustelle auf den speziellen Anwendungsfall abgestimmt werden konnte. Aus diesem Grund haben sich auch Zemente mit noch höheren FA-Gehalten nicht durchgesetzt. Bild 1 zeigt beispielsweise an einem bestimmten Zement die Abhängigkeit der Frühfestigkeit und der Hydratationswärme vom Flugaschegehalt, wobei zu berücksichtigen ist, daß den absinkenden 1-Tages-Festigkeiten bereits durch eine Anhebung der Feinheit entgegengewirkt wurde.

Durch den teilweisen Flugaschezusatz im Zementwerk und der damit erreichten Zurverfügungstellung eines bereits innig vermahlenden "Grundbindemittels", das nur geringe Schwankungen der Qualitätswerte aufwies, wurde ein wichtiger Schritt zur zielsicheren Spritzbetonherstellung, wie wir sie heute kennen getan. Der

Restzusatz an Flugasche an der Baustelle wurde dadurch minimiert - dieser Schritt wirkte sich auf die Gleichmäßigkeit des Spritzbetons und somit auch auf die Verarbeitbarkeit positiv aus.

Beispiele für die mit diesem Zement hergestellten Tunnelbauten sind der Roppener Tunnel (1987 - 89) und der Milser Tunnel (1986 - 88) bzw. zur Zeit die ÖBB-Tunnel-Umfahrung Innsbruck.

In Bild 2 ist die Qualitätsentwicklung des vom Zementwerk Kirchbichl gelieferten Tunnelzementes, beginnend mit dem Jahre 1978 graphisch dargestellt. Daraus ist die angesprochene Absenkung der 1-Tages-Festigkeiten ab Anfang der Achtziger Jahre auf Grund der Erfahrungen beim Arlbergtunnel erkennbar. Weiters die Einführung von Flugaschezement ab 1987, verbunden mit einem deutlichen Anstieg der Feinheit, bedingt durch die veränderten Mahlbedingungen bei Einsatz von Flugasche im Vergleich zu Hochofenschlacke.

2.2 Südösterreich

Die Entwicklung des Tunnelzementes im Werk Retznei in der Südsteiermark war eng mit der Entwicklung der Erstarrungsbeschleuniger gekoppelt.

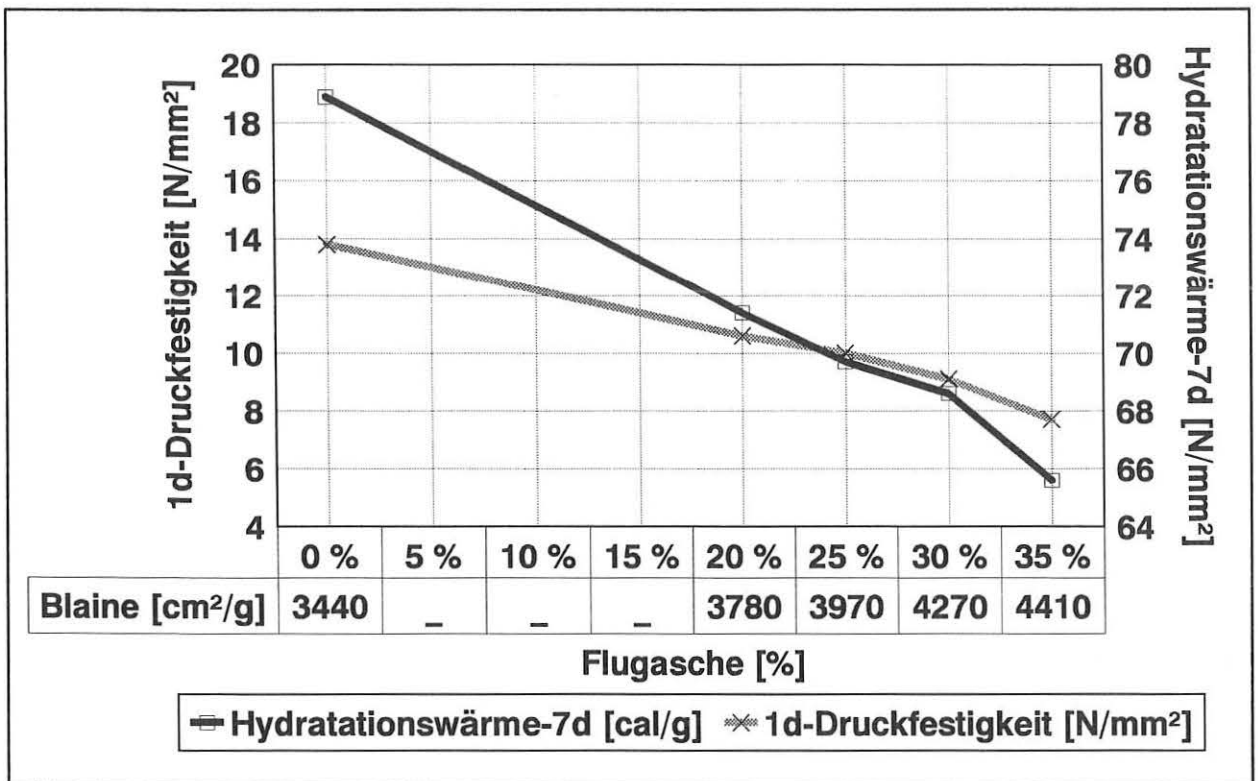


Bild 1: Flugascheanteil im Zement

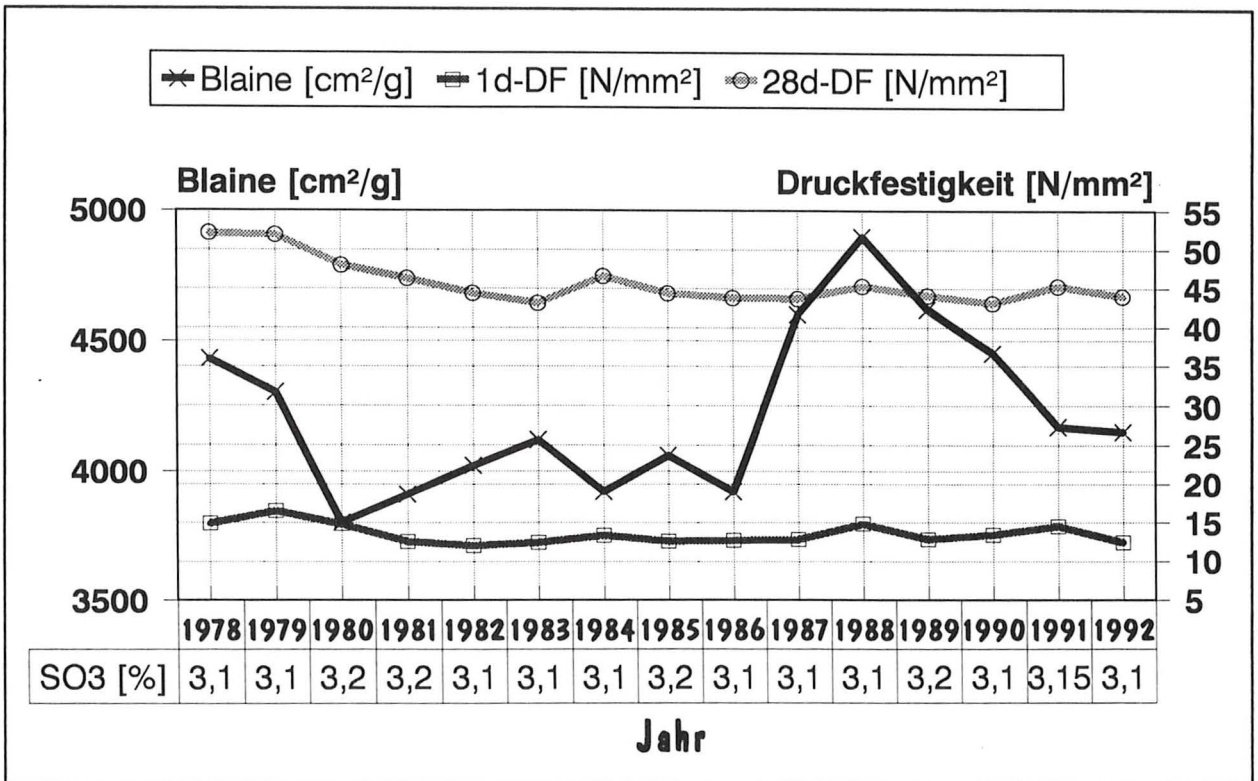


Bild 2: Entwicklung der Zementqualität für den Tunnelbau; Werk Kirchbichl (Tirol)

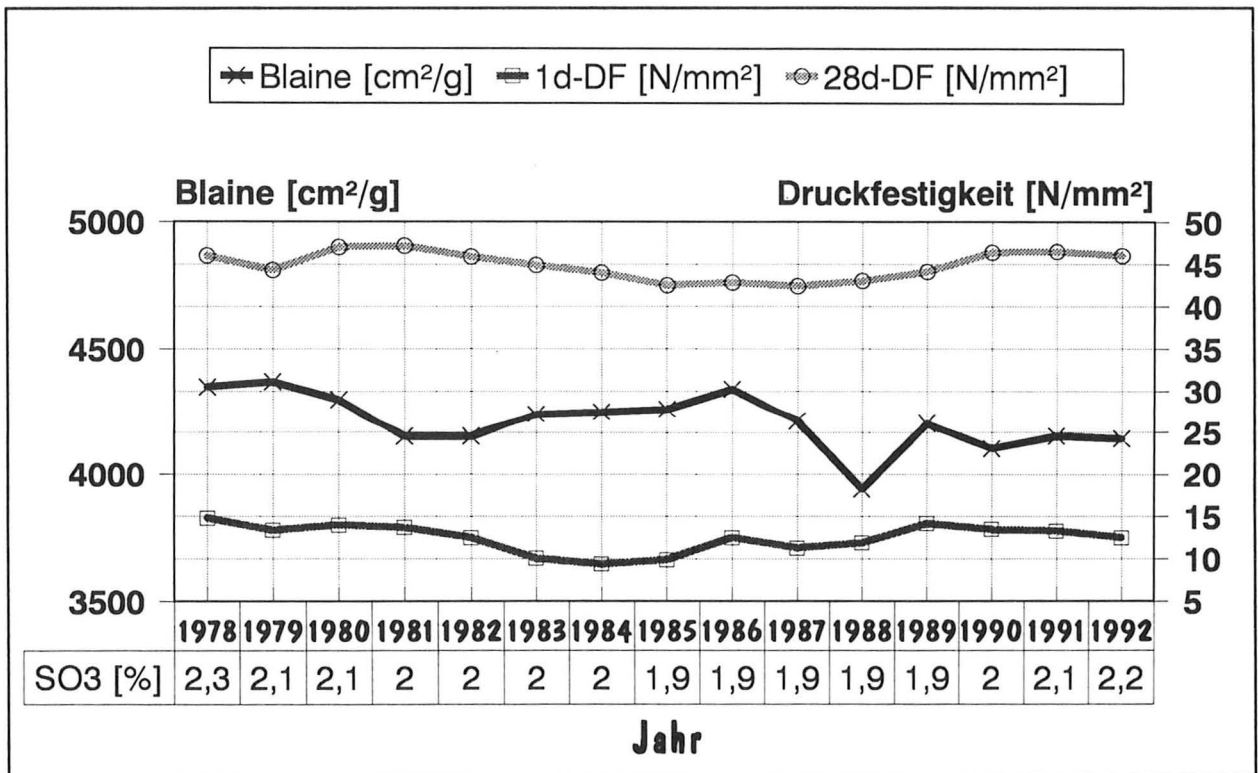


Bild 3: Entwicklung der Zementqualität für den Tunnelbau; Werk Retznei (Stmk)

Bis etwa 1980 wurde für Tunnelbauten in der Stmk. und OÖ (z.B. Gleinalmtunnel und Ganz-

steintunnel) ein hochofenschlackehaltiger Zement PZ 275 (H) geliefert, der sich von übli-

chem PZ 275 (H) für Fertigbetonwerke etc. nur wenig unterschied. Dieser Zement führte mit den damals eingesetzten festen Erstarrungsbeschleunigern immer wieder zu starken Schwankungen in der Spritzhilfedosierung. Die hohen Dosierungen führten zu hohen Festigkeitsrückgängen am Spritzbeton.

An diesen Schwierigkeiten zeigt sich die große Bedeutung, die dem Zusammenwirken von Zement und Erstarrungsbeschleuniger bei der Herstellung von Spritzbeton zukommt.

Zur bessern Verständlichkeit dieses Zusammenwirkens möchte ich etwas näher auf die chemischen Zusammenhänge eingehen. Im Augenblick, in dem der Zement mit dem Wasser zusammentrifft, laufen eine ganze Reihe von chemischen Reaktionen, die sich gegenseitig beeinflussen, nebeneinander ab. So gehen Alkalien, Kalzium und Sulfat in Lösung. An der Oberfläche der Klinkerkörner des Zements bilden sich unlösliche ettringitähnliche Phasen, die für eine Verzögerung weiterer Reaktionen sorgen und somit den Beton über mehrere Stunden verarbeitbar machen. Mit den Erstarrungsbeschleunigern greift man mit der Absicht, den Zement schon nach kurzer Zeit zum Erstarren zu bringen, sehr stark in dieses komplizierte Reaktionssystem ein. Ziel muß es dabei sein, die Konzentration der an der Ettringitbildung beteiligten Verbindungen, d.h. Kalkhydrat, Calciumsulfat, Tricalciumaluminat, soweit zu verändern, daß die Reaktion nicht nur an der Oberfläche der Klinkerkörner, sondern auch in der flüssigen Phase, zwischen den Körnern ablaufen kann und somit Erstarren nach kurzer Zeit bewirkt.

Eine "indirekte" Möglichkeit, die beteiligten Verbindungen in ihrer Konzentration anzuheben, besteht im Zusatz von Substanzen, die die Löslichkeit der Verbindungen beeinflussen (z.B. Natronlauge, Kalilauge, Natriumkarbonat, Kaliumkarbonat). Die zweite, "direkte" Möglichkeit, die Konzentration anzuheben, ergibt sich durch den tatsächlichen Zusatz dieser Verbindungen in gut löslicher und reaktionsfähiger Form (z.B. Natriumaluminat, Aluminiumhydroxid, Aluminiumsulfat oder Calciumformiat).

Nun enthalten die Zemente neben den Hauptbestandteilen auch eine Reihe untergeordneter Bestandteile, wie z.B. Alkalien, die die Löslichkeitsverhältnisse im Zement-Erstarrungsbeschleuniger-Wasser-Gemisch stark beeinflussen.

Es ist daher verständlich, daß der Erstarrungs-

beschleuniger für jeden Zement eine etwas andere optimale Zusammensetzung aufweist und daß diese Zusammensetzung auf den Zement eingestellt werden muß.

Da über die Zusammensetzung der Erstarrungsbeschleuniger und vor allem deren Veränderungen von den Spritzhilfherstellern nur selten Auskünfte gegeben werden, wird der Abstimmungsvorgang Zement/Erstarrungsbeschleuniger, der ja auch über den Zement geschehen kann, erschwert.

Im angesprochenen Fall konnte das Zusammenwirken von Erstarrungsbeschleuniger und Zement nach langwierigen Laboruntersuchungen durch eine gezielte Absenkung des dem Zement beigemahlten Gipses und somit des in Lösung gehenden Anteils an Sulfat, verbessert werden. In Bild 3 ist diese Entwicklung dargestellt, wobei auch deutlich das damit verbundene Absinken des Festigkeitsniveaus ersichtlich ist. Denn jeder Zement benötigt in Abhängigkeit seiner Zusammensetzung einen gewissen Anteil an Gips, d.h. Sulfat für eine optimale Festigkeitsentwicklung. Weichen die Gipsgehalte von diesem Optimum ab, dann weist der Zement auch ein geringeres Festigkeitsniveau auf. In diesem Fall konnten die geringeren Festigkeiten leicht verkraftet werden, da die verbesserte Wirkung im Spritzbeton bei geringeren Zusätzen an Erstarrungsbeschleunigern ohnehin zu einem Festigkeitsbonus führte.

Mit diesem "neuen" PZ 275 (H) für Tunnelbauten konnte über viele Jahre eine große Anzahl von Tunnelvorhaben in der Stmk., OÖ und Kärnten mit großem Erfolg durchgeführt werden. Beispiele sind der Tanzenbergtunnel, Plabutschunnel und Heubergtunnel.

Mit der zunehmenden Verwendung von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern Ende der Achtziger Jahre ergab sich wiederum eine neue Situation. Die flüssigen Spritzhilfen waren gegenüber den festen wesentlich "gutmütiger", der Zement konnte daher wieder auf die ursprüngliche Konzeption umgestellt werden (Bild 3).

Als vorläufig letzter Schritt wurde nun infolge der guten Erfahrungen, die mit dem Flugaschezement in Westösterreich gemacht wurden, im Jahre 1992 der Zuschlagstoff von Hochofenschlacke auf Flugasche umgestellt, so daß nunmehr auch in Südösterreich ein, dem westösterreichischem ähnlicher, PZ 275 (F) mit sehr gutem Erfolg eingesetzt wird.

2.3 Ostösterreich

In Ostösterreich wurde die Herstellung von Zement für den Tunnelbau durch den Wiener U-Bahn-Bau dominiert.

Während bis Anfang der Achtziger Jahre die U-Bahn-Röhren noch nach dem Tübbing-Verfahren hergestellt wurden, kam 1982 beim Bauabschnitt U6/1 die NÖT, über die jahrelange Erfahrungen im Gebirgstunnelbau vorlagen, nun auch im innerstädtischen Lockergebirge zum Einsatz. Die NÖT wird seither beim U-Bahn-Bau mit großem Erfolg angewendet.

Als Zement kam ein für diesen Fall jahrelang entwickelter hochsulfatbeständiger Tunnelzement "Contragress PZ 375" zum Einsatz. Obwohl dieser Zement bereits die Zeit davor im U-Bahn-Bau eingesetzt wurde, war eine spezielle Modifizierung notwendig, um ihn auch für Spritzarbeiten nach der NÖT einsetzen zu können. Großen Anteil an dieser Entwicklung, die auf den Erfahrungen bei der Sanierung des Bosrucktunnels aufbaute, haben zweifelsohne die Zusatzmittelhersteller mit der Entwicklung aluminatarmer Spritzbetonhilfen.

Vom Auftraggeber (MA 38, U-Bahn-Bau der Stadt Wien) wurde für die Arbeiten, bedingt durch die teilweise extrem hohen Sulfatgehalte (bis 1700 mg/l) im Grundwasser, ein hochsulfatbeständiger Zement vorgeschrieben. Der ausgewählte Contragress-Zement ist ein Portlandzement, der zum Unterschied von allgemein üblichen Zementen einen C_3A -Gehalt nach Bogue von Null aufweist. Der Sulfatangriff, der zur Bildung des voluminösen "Zementbazillus" und in weiterer Folge zu einer vollkommenen Zerstörung des Betongefüges führt, richtet sich in erster Linie gegen das Tricalciumaluminat (C_3A). Fehlt diese Verbindung im Portlandzement, dann erhöht sich die Sulfatbeständigkeit ganz bedeutend.

Bild 4 zeigt einen Auszug aus einem Prüfzeugnis über die Sulfatbeständigkeit von Contragresszement im Vergleich zu üblichem Portlandzement.

Für die Herstellung hochwertiger Betone für die Innenschalen der Wiener U-Bahn wird ebenfalls "Contragress PZ 375" eingesetzt.

An der Entwicklung einer allen Anforderungen entsprechenden Betonrezeptur für Innenschalen, waren die MA 38 in Zusammenarbeit mit der MA 39, der Materialversuchsanstalt Straß, den bauausführenden Firmen, einem Transportbetonwerk, den Zusatzmittelherstellern, sowie den Perlmooser Zementwerken be-

teiligt. Das Endprodukt ist heute unter der Bezeichnung "optimierter Innenschalenbeton" bekannt. Den wesentlichsten Einfluß beim "OIB" hat die Zusammensetzung und Dosierung des Zements. Der für Spritzbetonarbeiten entwickelte "Contragress PZ 375" zeigte sich auch für diesen Anwendungsfall bestens geeignet.

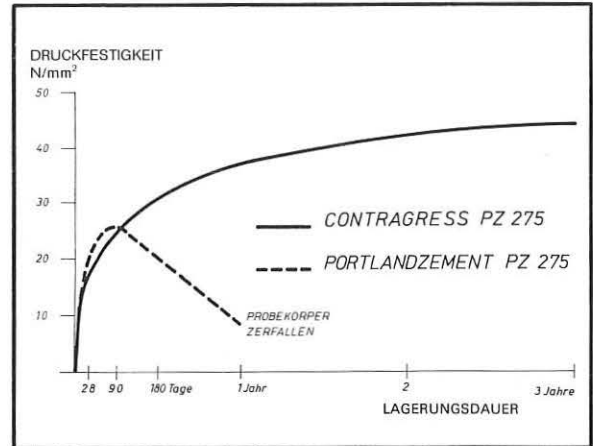


Bild 4: Druckfestigkeit von in 5 %-iger Magnesiumsulfatlösung gelagerten Mörtelprismen

Es wirkten sich besonders seine günstigen Eigenschaften, wie geringe Wasserabsonderung, geringe Hydratationswärme und günstige Festigkeitsentwicklung äußerst positiv aus. Weiters zeichnet sich dieser Zement auch durch eine sehr geringe Reißneigung aus, wodurch Reißbildung zufolge behinderter Schwind- und Temperaturspannungen im Beton herabgesetzt wird - z.B. wurden beim Bauabschnitt U6/3 auf rund 800 m Tunnellänge lediglich 3 undichte Fugen verpreßt.

Die Entwicklung der Qualität von Contragress PZ 375 seit dem Jahre 1978 ist in Bild 5 dargestellt. Deutlich ersichtlich ist die Anhebung der Festigkeiten für den Einsatz als Spritzbetonze-ment ab 1982.

Neben dem U-Bahn-Bau traten im Osten Österreichs klarerweise die Gebirgstunnels in den Hintergrund. Dazu ist als aktuelles Projekt der Säusensteintunnel zu nennen, wobei die in Westösterreich gewonnenen Erfahrungen übernommen wurden und ebenfalls Tunnelbau-Flugaschezement zum Einsatz kommt.

3. Betrachtung der derzeitigen Situation und Ausblick

Wie aus der in Pkt.2 beschriebenen Entwick-

lung der Zementqualität hervorgeht, hat sich im Tunnelbau der Einsatz eines, etwa 20 % Flugasche als Zuschlagstoff enthaltenden PZ 275 (F) österreichweit durchgesetzt.

Dieser Zement stellt ein - für Spritzbeton und Innenschalenbeton - optimales "Grundbindemittel" mit besonderer Gleichmäßigkeit dar, welches an der Baustelle durch weiteren Flugaschezusatz auf den speziellen Anwendungsfall abgestimmt werden kann.

Bei sulfathaltigen Grundwässern kommt es zum Einsatz von hochsulfatbeständigen Zementen, wie z.B. "Contragress PZ 375" (0 % C₃A) bzw. "HS-Zementen" (<3% C₃A). Der hohe Entwicklungsstand von Qualitäts-Spritzbeton wurde in der Spritzbeton- Richtlinie 1989 verankert. Darin sind auch die besonderen Anforderungen an die Qualität des Zements, die über die Anforderungen nach der ÖNORM hinausgehen, festgesetzt. Die bisherige Entwicklung, etwa am Beispiel des Zusammenwirkens von Zement und Erstarrungsbeschleuniger, zeigt wie wichtig die Festlegung einer Qualitäts-Bandbreite für die Zementeigenschaften ist.

Die Anforderungen an Zement für Spritzbeton

nach der Richtlinie 1989 sind im wesentlichen folgende:

+Erstarrungsbeginn muß zwischen 1½ und 4 Stunden liegen (in der Ö-Norm: 1 h bis 12 h)

+Das Zementwerk muß für den zu liefernden Zement eine mittlere Mahlfeinheit, d.h. einen mittleren Blainewert, der zwischen 3500 - 4500 cm²/g liegen muß, angeben. Die Feinheit des tatsächlich gelieferten Zementes darf dann nur eine Standardabweichung von + 5 % vom gewählten Mittelwert aufweisen (z.B. bei 4000 cm²/g: + 200 cm²/g).

+Was die Festigkeitsentwicklung betrifft, so sind Druckfestigkeiten nach einem Tag von 7 N/mm² und 28 d von 39 N/mm², jeweils 5 % Fraktile festgelegt. 5 % Fraktile heißt, daß 95 % aller Festigkeitsprüfungen über diesem Wert liegen. Bei besonderen Eigenschaften an den jungen Spritzbeton wird nach einem Tag eine Druckfestigkeit von 9 N/mm², als 5 % Fraktile gefordert. Die Standardabweichung der 28 d-Druckfestigkeit darf jeweils 3,5 N/mm² nicht überschreiten.

+Grenzwert für das Bluten: < 20 cm² (Heidelberger Methode).

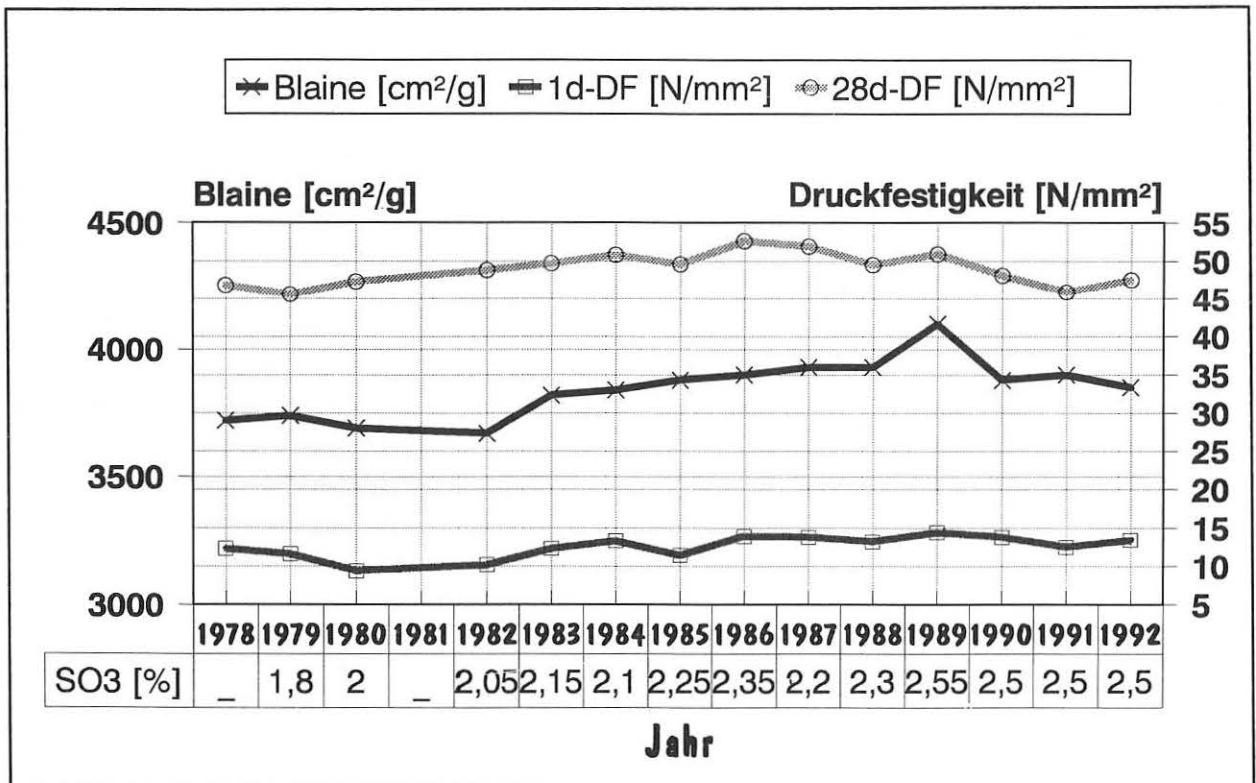


Bild 5: Qualitätsentwicklung von Contragress PZ 375; Werk Mannersdorf (NÖ)

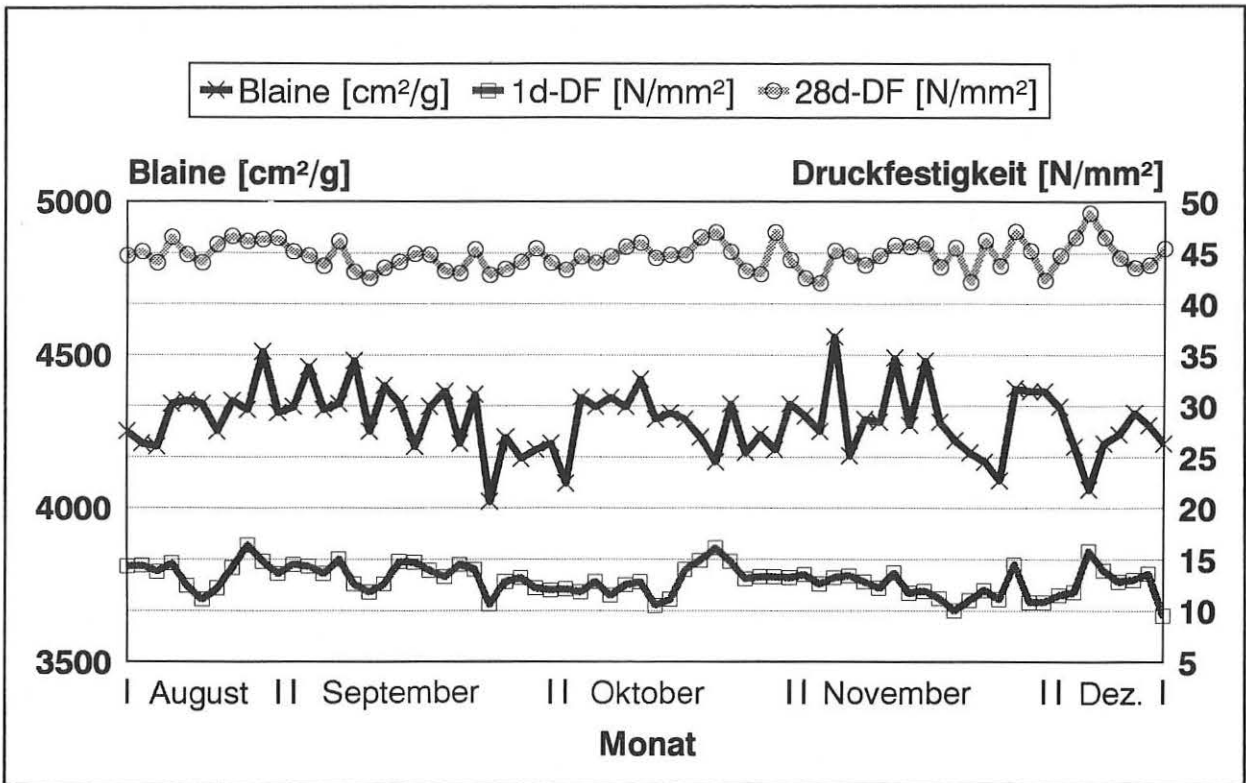


Bild 6: PZ 275(F) - Tunnelzement Retznei

Die tatsächliche Schwankungsbreite der gelieferten Qualität ist am Beispiel PZ 275 (F)-Tunnelzement Retznei - Zeitraum August 92 bis Dezember 92 - in Bild 6 dargestellt.

Eine der Spritzbeton-Richtlinie ähnliche Formulierung bzw. Festsetzung der erhöhten Anforderungen an Zement für Innenschalenbeton in einer Richtlinie ist derzeit in Ausarbeitung. Besonders wichtig, und über die Anforderungen an Spritzbeton hinausgehend, wird dabei die Berücksichtigung der Hydratationswärme der Zemente sein.

Als einen der wesentlichsten Punkte für die Zukunft sehen wir beim klassischen Spritz- und Innenschalenbeton die Absicherung und Bestäti-

gung der derzeit gelieferten Zementqualitäten. An Entwicklungen für spezielle Anwendungsfälle wird von der Zementindustrie, wie die Beispiele "Perlmooser-Schnellzement - TIWAG-Spritzverfahren" oder "Vilser gipsfreier Zement" zeigen, laufend gearbeitet.

Zur Zeit wird von Perlmooser auch an der Entwicklung eines Zements für das Trockenspritzverfahren gearbeitet, welcher mit feuchten Zuschlägen ohne Festigkeitseinbußen vorge-mischt werden kann und in weiterer Folge durch verringerte Erstarrungsbeschleunigerzusätze die Festigkeitseinbußen minimiert. Die Dichtigkeit des Betongefüges soll dadurch verbessert und damit die Auslaugung im Sinne des Grundwasserschutzes verringert werden.