
Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton unter Druckluft

AIR PERMEABILITY OF SPRAYED CONCRETE USED IN TUNNEL LINING WITH COMPRESSED AIR SUPPORT

MARKUS PFEUFFER, JOHANN SCHARZENLANDER

Das Trockenspritzverfahren unter Druckluft hat im unterirdischen Hohlraumbau besonders in wasserführendem Lockergestein eine vorrangige Bedeutung erhalten. Infolge seiner Flexibilität und hohen Frühfestigkeitsentwicklung weist es besonders im innerstädtischen Tunnelbau technische und wirtschaftliche Vorteile auf. Neben einer größeren Umweltverträglichkeit, höheren Sicherheit gegen Wassereinbrüche, Verminderung der Setzungen entfällt im Vergleich zu herkömmlichen Grundwasser-Beseitigungs-Methoden das Absenken sowie das Absperren des Grundwassers längs der Tunneltrasse. Diese Gesichtspunkte rücken im innerstädtischen Tunnelbau mehr und mehr in den Vordergrund, da der U-Bahn-Bau zunehmend dicht bebaute Innenstadtzonen unterfährt und meistens nicht an vorhandenen Straßenzügen angepasst werden kann.

Bei der Spritzbetonbauweise unter Druckluft spielt der Luftverbrauch eine wichtige Rolle. Nach den vorliegenden Erfahrungen sind die Luftverluste der Spritzbetonschale neben den Schleusungs- und Ortsbrustverlusten für den Gesamtluftverbrauch maßgebend. Im Folgenden wird über die verfahrenstechnischen sowie betontechnologischen Auswirkungen auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren wie z. B. Aufspritzen von Abdichtungen, Spritzschatten, Spritzbetonstärke sowie -porosität und Frühfestigkeitsentwicklung berichtet.

The dry-mix shotcrete method used in tunnelling together with compressed air support of the face, has attained high-ranking importance in subterranean excavation, particularly in loose soil that is porous to water. In view of its flexibility and high early strength properties it shows clear technological and economic advantages, especially in the case of inner-city tunnel construction. Besides the benefits of a higher degree of environmental sustainability, improved security against flooding and reduced deformations, it also, in contrast with traditional groundwater management methods, obviates the need of lowering or blocking off the groundwater for the length of the tunnel. These aspects of the method are coming increasingly to the fore in inner-city tunnel construction, seeing that underground railways increasingly have to be constructed beneath heavily built-up inner-city areas and cannot often be adapted to the existing course of roads.

In the New Austrian Tunnelling Method with use of compressed air support, air consumption plays an important part. It appears from experience to date that air loss through the sprayed concrete shell, as well as air lock loss and loss through the tunnel face, is the most important factor in determining air loss

over all. In what follows we will be considering the effects, in terms of technological methods and concrete technology, on the air permeability of sprayed concrete using the dry-mix process, considering such aspects as the spraying of sealing layers, of sand pockets or voids behind reinforcing steel, as well as the layer thickness, porosity and early strength properties of sprayed concrete.

1. Einleitung

Im unterirdischen Hohlraumbau erfordert der Bauzustand in wasserführendem Lockergestein das Fernhalten von Grundwasser aus dem Arbeitsbereich. Das Grundwasser lässt sich im Bauzustand durch vorauslaufende oder begleitende Bauhilfsmaßnahmen aus dem Arbeitsbereich fernhalten. Die für das Absperren infolge durch Dichtungswände, Injektionskörper und Vereisungskörper oder Absenken z.B. durch offene oder geschlossene Wasserhaltung eingesetzten Methoden sind überwiegend vorauslaufende Maßnahmen. Mit dem Vortrieb vor Ort sind sie nur beschränkt einsetzbar. Neben der hohen Setzungsgefahr sind es im innerstädtischen Bereich vornehmlich Umweltschutzaspekte, die in verschiedenen Fällen ein Absenken des Grundwasserspiegels nicht zulassen und somit ein kurzfristiges Verdrängen des Wassers fordern. Auch die zunehmend dicht bebauten Innenstadtzonen und die teilweise nicht an vorhandenen Straßenzügen orientierte U-Bahn-Baulinie erlauben nur bedingt ein Absperren bzw. Absenken des Grundwassers im wasserführenden Lockergestein.

Möglichkeiten zum Verdrängen des Grundwassers durch den Vortrieb begleitende Bauhilfsmaßnahmen sind der Einsatz von Flüssigkeitsdruck auf die Ortsbrust im Schildvortrieb oder die Aufrechterhaltung von Luftüberdruck im Arbeitsraum nach der NÖT-"Neuen Österreichischen Tunnelbauweise". Dabei wird zum Verdrängen des anstehenden Wassers komprimierte Luft in einem, im allgemeinen einseitig zum Erdreich hin offenen Hohlkörper, der im Bereich des Grundwassers als Bauelement dienen soll, eingeblasen. Der Luftdruck muss dem hydrostatischen Druck des anstehenden Wassers das Gleichgewicht halten. Die Sicherung des Ausbruchquerschnittes erfolgt nach der NÖT mit einer normalerweise bewehrten Spritzbetonschale.

Bei der Spritzbetonbauweise unter Druckluft sind aufgrund der Durchlässigkeit des Untergrundes und der Spritzbetonschale Druckluftverluste unvermeidbar. Abgesehen von den Schleusenverlusten, wird sich der Luftverbrauch aus den Luftverlusten an der Ortsbrust und den Luftverlusten durch die fertige Spritzbetonschale zusammensetzen:

$$Q = Q_O + Q_M + Q_S$$

Q_O = Luftverbrauch an der Ortsbrust

Q_M = Luftverbrauch der Spritzbetonschale

Q_S = Luftverbrauch der Schleusungen.

Nach den vorliegenden Erfahrungen sind die Luftverluste durch die Spritzbetonschale für den Gesamtluftverbrauch maßgebend. Q_O und Q_M sind allerdings nur dort zu erwarten, wo in der Ortsbrust oder längs der Mantelfläche des Vortriebs durchlässige Schichten mit Durchlässigkeitswerten von $K > 10^{-5}$ m/s anstehen [1, 2].

2. Theoretische Betrachtung der Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton

Transportvorgänge von Gasen in Beton sind in erster Linie abhängig von der

- Porosität und Porenstruktur des Zementsteins
- Physikalischen Eigenschaften des Mediums
- Grenzflächeneffekte zwischen Beton und Medium
- Rissarten im Beton.

Die Poren stellen den Transportraum dar, der für die Bewegung zur Verfügung steht. Dazu zählen die Luft-, Verdichtungs- und Kapillarporen im Zementstein. Es sind aber nur solche am Durchgang von Gasen beteiligt, die so untereinander vernetzt sind, dass sie Porenkanäle bilden, die von einer Seite das Bauteils bis zur anderen reichen.

Die Porenstruktur des Zementsteins wiederum wird von der Frischbetonzusammensetzung, der Herstellung, der Nachbehandlung und vom Aushärtungsgrad beeinflusst. Eine geringere Gesamtporosität kann durch einen niedrigen w/z-Wert erreicht werden. Dadurch kommt es von Anfang an zu einer dichten Lagerung der Zementkörner. Eine weitere Möglichkeit ist die Zugabe von Zusatzstoffen wie z.B. Kunststoffen, die eine Verstopfung der Poren bewirken. Auch die Feuchte und Temperatur beeinflussen die Gesamtporosität. Bei gleichem Hydratationsgrad weisen trockene Betone eine höhere Durchlässigkeit auf als feuchte, da bei befeuchteten die Luftströmung durch das Wasser in den Kapillarporen behindert oder zumindest verzögert wird [3].

Im Falle der Wasserhaltung durch Druckluft wird der Spritzbeton unmittelbar nach dem Auftragen mit Druckluft belastet. Der Frühfestigkeitsentwicklung kommt somit eine besondere Bedeutung zu, da durch eine schnelle Aushärtung der Grad der negativen Beeinflussung gering gehalten werden kann [3].

Ein weiteres Kriterium für den Stofftransport ist die mittlere freie Weglänge beim Impulsaustausch von Gasen. Sie stellt eine wahrscheinliche Wegstrecke dar, die ein Molekül zurücklegt, bis es auf ein anderes trifft. In der Zementsteinmatrix treten Porenabmessungen auf, die kleiner als die freie Weglänge der Moleküle sind. Die Molekülstöße mit der Porenwand werden häufiger als die Stöße untereinander. Der Transport der Moleküle wird dann als Molekulartransport oder Effusion bezeichnet. Dieser Zustand ist abhängig von der Temperatur und den Druckverhältnissen [3]. Praktische Erfahrungen im Münchner U-Bahn-Bau haben gezeigt, dass die Luftdurchlässigkeitsbeiwerte in der Firste bei einem Druckunterschied von ca. 0,6 bar die gemessenen Werten in der Ulme um zwei Zehnerpotenzen überragen [4].

Einfluss auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton haben auch die Rissarten wie Mikro-, Oberflächen-, Biege- oder Trennrisse. Sie sind auf eine Vielzahl

von Ursachen zurückzuführen. Hauptsächlich handelt sich um Lastbeanspruchungen und Zwangsbeanspruchungen. Dabei muss unterschieden werden, ob die Risse im noch nicht erhärteten Beton oder erst im erhärteten Beton entstanden sind. Im ersten Fall ist die Ursache nach der Erhärtung nicht mehr vorhanden - durch Verpressung kann der Schaden behoben werden. Die Durchlässigkeit von gerissemem Beton kann im Allgemeinen proportional zur dritten Potenz der Rissweite angenommen werden [5].

3. Versuchsdurchführung

Die Spritzbetonversuche zur Luftdurchlässigkeitsmessung unter Druckluft wurden auf dem Versuchsgelände von Rohrdorfer-Zement durchgeführt. Zur Anwendung kam ein Druckbehälter bei dem die Messung der Luftdurchlässigkeit auf der Unterseite des Behälters erfolgte, um Messfehler durch Undichtigkeiten des Deckels zu vermeiden. Für das Ausschließen weiterer Undichtigkeiten wurde der Druckbehälterboden vor jedem Spritzen mit einem niedergeschraubten Gitter, wassergesättigtem Flies und einer Dichtmassespachtelung an der Wand vorbereitet (siehe Bild 3).

Bei den Spritzversuchen wurde der Druckbehälter über Kopfhöhe und mit nach unten geneigter Öff-



Bild 1: Vorauslaufende und begleitende Bauhilfsmaßnahmen zum Fernhalten des Grundwasser aus dem Arbeitsbereich (U-Bahn-Baulos U6 Garching bei München)



Bild 2: Tunnelportal mit Druckschleusenkammern (U-Bahn-Bau U6 Garching bei München)



Bild 3: Spritzbetonversuche zur Luftdurchlässigkeitsmessung unter Druckluft

nung platziert. Die Neigung war notwendig, um Rückprallansammlungen in dem Behälter zu vermeiden. Die aufgetragene Spritzbetonstärke betrug ca. 17 cm. Vom Zeitpunkt der Beendigung des Spritzvorganges bis zur Druckbeaufschlagung vergingen ca. 10 Minuten. Die Druckbeaufschlagung von 1,0 bar ergab sich aus den bestehenden U-Bahn Baustellenbedingungen in München (Bauvorhaben: U6-Garching der Kunz GmbH). Die Luftdurchlässigkeit wurde mit einem geeichten Durchflussmessgerät ermittelt (siehe Bild 4). Weitere Prüfungen wie die Haftzug-, Druckfestigkeit und Wasserundurchlässigkeitsprüfung erfolgten an Bohrkernen nach der DIN 1048.

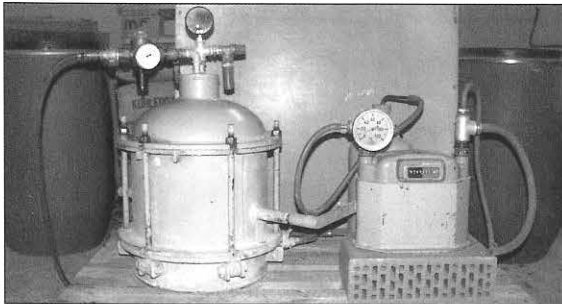


Bild 4: Geeichtes Luftdurchlässigkeitsmessgerät

Die Zuschlagszusammensetzung der Ausgangsmischung wurde als Parameter für alle Versuche konstant gehalten, um vergleichbare Bedingungen für die Versuchsauswertung zu schaffen. Es wurde ein natürlich ofentrockener Zuschlag (Rohdichte = $2,68 \text{ kg/dm}^3$) mit einem Größtkorn von 8 mm verwendet. Als Bindemittel kam bei allen Versuchsreihen ein Schnellspritzzement mit der Produktbezeichnung CEM I 32,5-R SE zum Einsatz.

Bei der Spritzmaschine handelte es sich um eine ALIVA 240 mit einem 2,3 Liter Rundlochmotor mit der Einstellung 10 Umdrehungen pro Minute (Spritzleistung ca. $1 \text{ m}^3/\text{h}$). Die Spritzleistung wurde bewusst niedrig gehalten, um stets eine gleichmäßiges Einspritzen des Druckbehälters zu erzielen. Der Spritzschlauch hatte eine Länge von 40 m und der Schlauchdurchmesser betrug 38 mm. Als Spritzdüse wurde die Ultrawirbelmischdüse mit Hochdruckwasser der Firma Clever verwendet.

4. Maßnahmen zur Verminderung der Luftdurchlässigkeit

4.1 Verfahrenstechnische Maßnahmen

4.1.1 Spritzschatten

Durch Spritzschatten, die im Bereich der aufgestellten Tunnelbögen entstehen können, ist die Gefahr

erhöhter Luftdurchlässigkeiten relativ groß. Dieser Umstand wird durch fein strukturierte Staubaansammlungen an der Spritzbetonoberfläche ersichtlich, da die entweichende Luft extrem leichte Staubpartikel mitreisst.

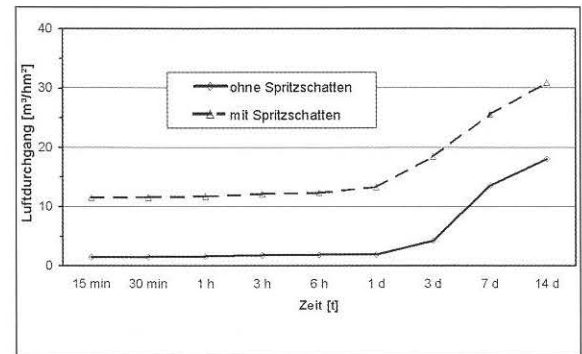


Bild 5: Auswirkungen von Spritzschatten auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren mit Schnellspritzzement

Bei den untersuchten Luftdurchlässigkeitsmessungen mit Spritzschatten zeigte sich ein vermehrter Luftdurchgang. In Abhängigkeit der Spritzschatten erhöhte sich die gemessene Luftdurchlässigkeit um ein Vielfaches (siehe Bild 5).

Eine Beseitigung der wider Erwarten auftretenden Restporosität kann mit einem gezielten Verpressen im Bogenbereich erreicht werden. Entlang der Gitterträger können perforierte Injektionsschläuche mittig eingebaut und eingespritzt werden. Nach einer Aushärtedauer von ca. einer Woche werden diese mit einer Zementsuspension verpresst.

4.1.2 Abdichtungen

Bei Rissen in der Spritzbetonschale bestehen im wesentlichen zwei Möglichkeiten, die Luftdurchlässigkeit zu verringern:

- Aufspritzen von Abdichtungen auf die Betonoberfläche
- Injizieren der Risse.

Das Injizieren von Rissen ist aus Kostengründen nur auf Sonderfälle (große Risse) beschränkt.

Für großflächige Versiegelungen der Spritzbetonmantelfläche kommen Abdichtungen bis zu einer Stärke von ein bis zwei Zentimeter in Frage. Es besteht die Möglichkeit nur die kritischen First- und Ulmenbereiche zu versiegeln. Auf größere Schichtstärken muss aufgrund der geringen Baulöcheranzen verzichtet werden, es sei denn, ihr Einsatz wird geplant und die lichten Tunnelabmessungen werden vorab vergrößert.

Die Proben für die Luftdurchlässigkeitsmessung mit Abdichtungen wurden sieben Tage lang mit einem Luftdruck von 1,0 bar belastet. Danach wurde die Messung unterbrochen, die entsprechende Abdichtung gemäß *Tabelle 1* mit einer Schichtstärke von ca. zwei Zentimeter aufgespritzt und anschließend wieder mit 1,0 bar Druckluft belastet.

Produktbezeichnung	Zuschlag Größtkorn [mm]	Zementleimgehalt [%]
Abdichtung A	-	90
Abdichtung B	0,5	60

Tab 1: Zusammensetzung der anorganischen Abdichtungen

In der ersten Abdichtungsphase konnten die Luftverluste beider Abdichtungen von ca. 15 m³/hm² auf ca. 7 m³/hm² reduziert werden (ca. 50 %). Nach einem Tag erreichte die Luftdurchlässigkeit der Probe mit der Abdichtung A wieder ihre ursprüngliche Luftdurchlässigkeit, d.h. es konnte keine Verbesserung erzielt werden. Dies ist offensichtlich auf den hohen Zementleimgehalt und somit der hohen Rissbildung zurückzuführen (siehe *Bild 6*).

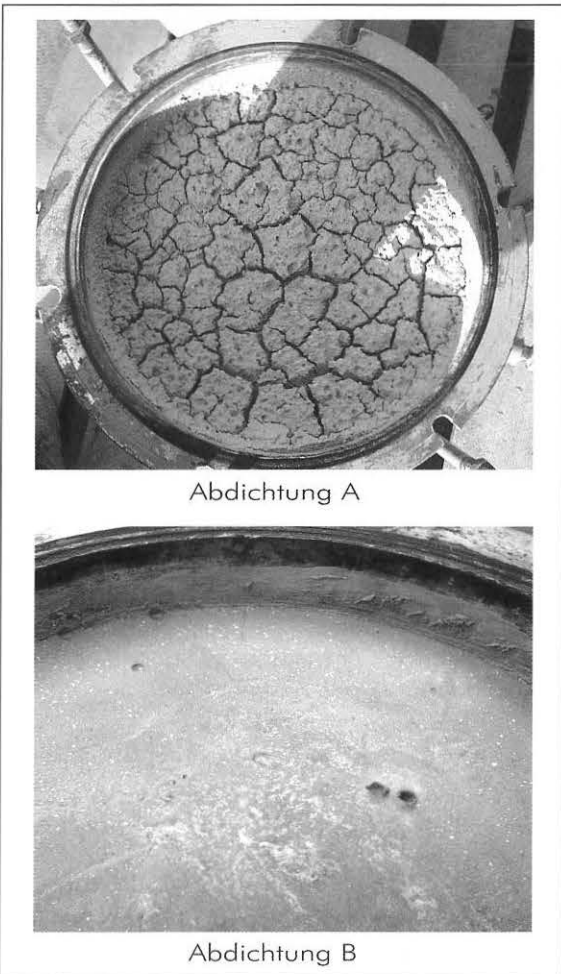


Bild 6: Aufgespritzte Abdichtungen nach 14 Tagen

Mit der Abdichtung B konnte dagegen der stetige Anstieg des Luftverlustes unterbrochen werden. Über den gesamten Messzeitraum von 14 Tagen wurde eine Druckluftreduktion bis zu 50 % erreicht (siehe *Bild 7*).

Durch den geringen Zementleimgehalt und einem Größtkorn von 0,5 mm konnten nach 14 Tagen keine signifikante Rissbildungen an der Oberfläche festgestellt werden (siehe *Bild 6*). Die Abdichtung B erreichte nach 28 Tagen eine Haftzugfestigkeit von ca. 1,7 N/mm².

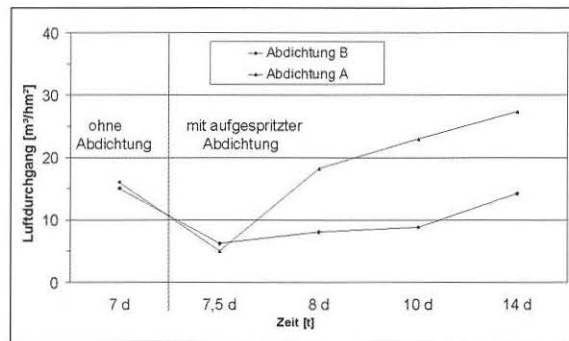


Bild 7: Auswirkungen von Abdichtungen auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren mit Schnellspritzzement

4.1.3 Spritzbetonstärke

Von den verfahrenstechnischen Maßnahmen zur Reduzierung und Begrenzung der Druckluftverluste hebt sich das Verstärken der Spritzbetonschale im Vergleich zum Auftragen von Abdichtungen deutlich ab. Die Luftdurchlässigkeit verringerte sich annähernd proportional zu ihrer Stärke. Bei einer Nachrechnung konnte der Luftdurchgang bei einer Spritzbetonstärke von 21 cm gegenüber einer Schichtstärke von 10 cm bis zu 90 % reduziert werden (siehe *Bild 8*).

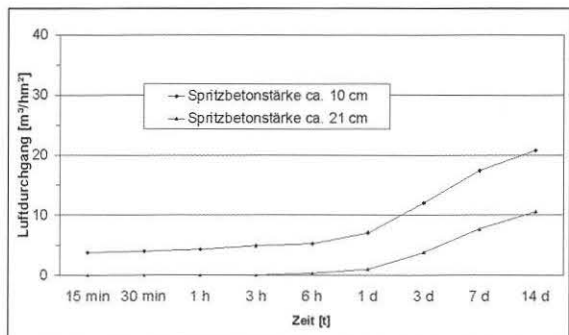


Bild 8: Auswirkungen der Spritzbetonstärke auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren mit Schnellspritzzement

Auf der Baustelle sollte dies die erste Maßnahme sein um Druckverluste über die Tunnelmantelfläche zu verringern. Für die Reduzierung der Druckverluste spricht eine rasche und problemlose Erhöhung der Spritzbetonstärke, ohne das Vortriebskonzept zu beeinflussen oder eine Änderung der Gerätekongfiguration vornehmen zu müssen.

Die Grenzen sind dabei einerseits das erforderliche Lichtraumprofil und auf der anderen Seite die statisch benötigte Sollstärke.

4.2 Betontechnologische Maßnahmen

4.2.1 Porosität

Für die Herstellung eines gegen Druckluft undurchlässigen Beton wirken sich alle Maßnahmen günstig aus, die die Porosität der Spritzbetonschale verbessern. Eine Möglichkeit ist die Variation der Wasserzugabe.

Die Auswirkungen des Wasserzusatzes auf die Luftdurchlässigkeit wurde mit einem Schnellspritzzement an drei Abstufungen im Trockenspritzverfahren untersucht. Der Untersuchungsbereich wurde mit einer unteren Grenze (w/z -Wert = 0,42) und mit einer oberen Grenze (w/z -Wert = 0,52) beschränkt. Die Luftdurchlässigkeit reduzierte sich beim w/z -Wertwechsel von 0,52 auf 0,48 um mehr als 50 % (siehe Bild 9). Die weitere Verringerung des w/z -Wert (von 0,48 auf 0,42) brachte keine Verbesserung hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit. Der Luftdurchgang erhöhte sich um ein Vielfaches, was vermutlich auf die größere Porosität infolge Spritzschatten zurückzuführen ist.

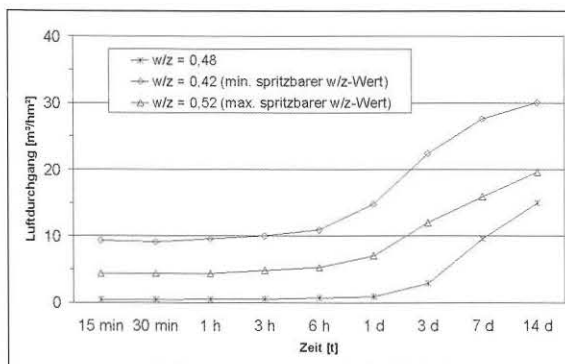


Bild 9: Auswirkungen verschiedener w/z -Werte auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren mit Schnellspritzzement

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Porosität der Spritzbetonschale ist die Erhöhung des Spritzzementgehaltes. Die Luftdurchlässigkeit konnte mit der Erhöhung des Zementgehaltes (von

350 kg/m^3 auf 400 kg/m^3) bis zu einem Tag um mehr als 50 % reduziert werden. Nach drei Tagen war der Luftdurchgang bei der Probe mit 400 kg/m^3 allerdings deutlich größer als bei der Probe mit 350 kg/m^3 . Offensichtlich kommt es nach einigen Tagen infolge Zwangsspannungen zu einer erhöhten Mikrorissbildung, die zu einer größeren Luftdurchlässigkeit führen (siehe Bild 10).

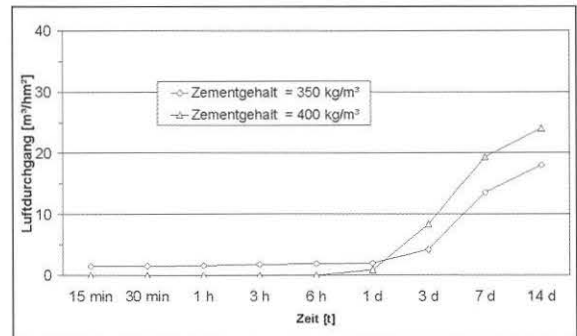


Bild 10: Auswirkungen verschiedener Schnellspritzzementgehalte auf die Luftdurchlässigkeit von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren

4.2.2 Frühfestigkeit

Beim Auftragen von Spritzbeton unter Druckluft sollte eine gleichmäßige, hohe Frühfestigkeit des Spritzbetons erreicht werden, um eine schnelle Aushärtung zu gewährleisten und somit den Grad der negativen Beeinflussung wie zum Beispiel Schäden in der Spritzbetonschale hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit gering zu halten. Eine hohe Frühfestigkeitsentwicklung erhöht insbesondere bei schwierigem Baugrund, die Arbeitssicherheit des Personals vor Ort, da hierdurch die Gefahr von z.B. herabfallendem Spritzbeton aus dem Firstbereich vermindert wird.

In der Versuchsreihe konnte mit einer Frühfestigkeitsentwicklung J III - geprüft nach der Richtlinie Spritzbeton - gegenüber einer Festigkeitsentwicklung J I bei sonst konstanten Ausgangsparametern (Zementgehalt 350 kg/m^3 , w/z -Wert = 0,48) die Luftdurchlässigkeit bis zu 30 % verringert werden (siehe Bild 11).

4.2.3 Nachbehandlung

Eine Nachbehandlung des Spritzbetons kann unter Umständen z. B. durch Aufsprühen von Wasser ratsam sein, um so ein Austrocknen und damit eine Erhöhung seiner Luftdurchlässigkeit zu verhindern. Ein anfänglicher nahezu luftdichter Beton kann durch eine anhaltende Luftdurchströmung austrocknen