Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 102 (1984)
Heft: 14

Artikel: Eigenschaften des Spritzbetons und ihre Prüfung, I. Teil
Autor: Teichert, Pietro
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75439

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eigenschaften des Spritzbetons und ihre Prüfung - I. Teil

Von Pietro Teichert, Avegno

Jeder Baufachmann dürfte heute mehr oder weniger genau wissen, wie Spritzbeton entsteht und wofür man ihn verwendet. Noch recht unbekannt ist hingegen, welche Eigenschaften Spritzbeton hat und wie man diese prüfen kann. Der folgende Aufsatz soll dazu beitragen, diese Lücke zu schliessen. Er stützt sich auf acht Jahre Grundlagenforschung und wertet fast viertausend Prüfergebnisse aus.

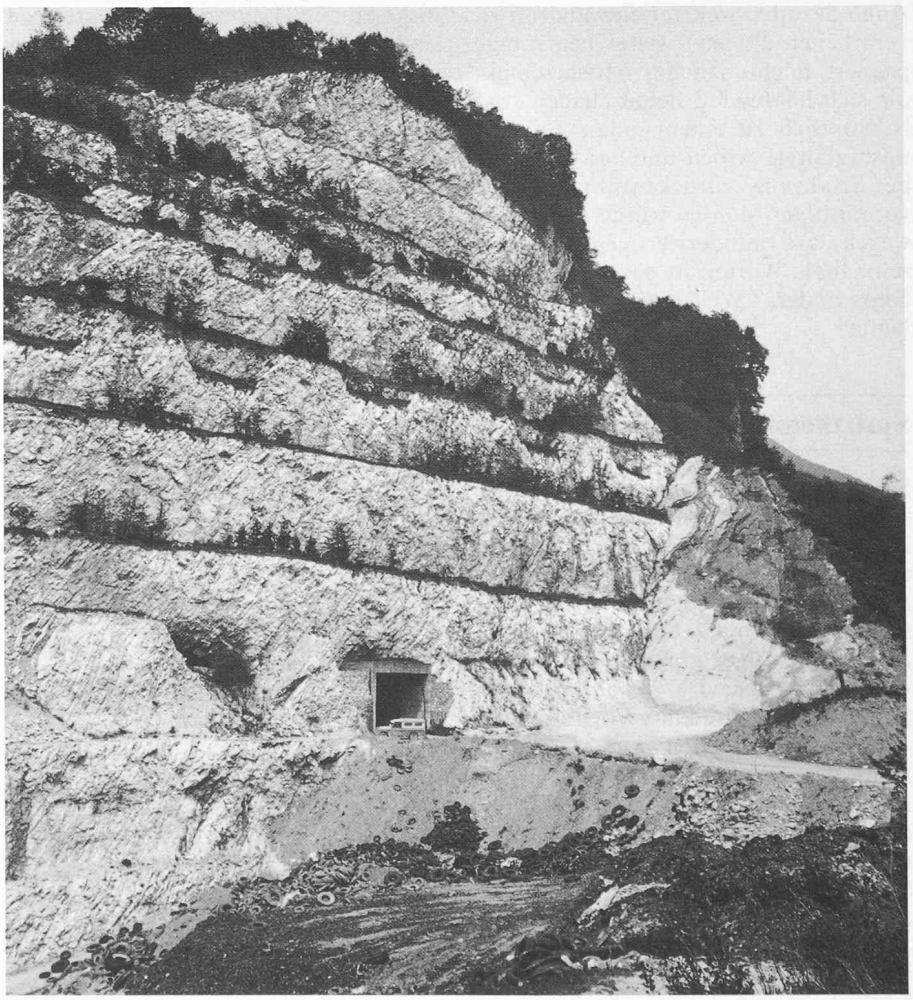
Betonspritzen ist ein Handwerk, das grösstenteils auf viel praktischer Erfahrung, aber auch auf theoretischem Wissen beruht. Dieses Metier lässt sich nicht durch die Lektüre von Büchern und die Befolgung von Vorschriften und Anleitungen erlernen; hingegen kann man sehr wohl die praktischen Fertigkeiten durch das Wissen um betontechnologische Zusammenhänge und konstruktive Gesetzmässigkeiten aufwerten und ergänzen [1, 2, 3, 4, 5].

Das Betonspritzverfahren hat in den vergangenen zwanzig Jahren einen gewaltigen Aufschwung erlebt. Vor allem im Untertagebau und bei Instandsetzungen schadhafter Bauten aus Beton und Mauerwerk, aber auch auf anderen Gebieten wird Spritzbeton weltweit zunehmend verwendet. Ein Ende dieser Entwicklung ist in absehbarer Zeit nicht zu erkennen. Spritzbetonarbeiten führen längst nicht mehr nur Spezialfirmen aus, sondern auch viele übliche Bauunternehmungen. Wegen der Verbreitung des Verfahrens haben immer weitere Kreise mit Spritzbeton zu tun. Alle im Tiefbau tätigen Fachleute, etwa die Bauherren der öffentlichen Hand, die Baudienste der Bahnen, der Armee und des Strassenunterhaltes, projektierende Ingenieure, Bauleitungen und Baustellenchefs, aber auch die Dozenten an den Fachschulen müssen heute über Spritzbeton Bescheid wissen. Dazu gehören selbstverständlich auch Kenntnisse der Eigenschaften und der Qualitätskontrolle.

Durchblättert man hierzulande Angebotsformulare und die besonderen Vorschriften für die Ausführung von Spritzbetonarbeiten, so findet man selten Angaben zur verlangten Qualität. Wenn überhaupt, ist eine mehr oder weniger genau bestimmte Mindestfestigkeit vorgeschrieben; von Dichtigkeit oder Haftung ist kaum die Rede, von anderen Qualitätskriterien ganz zu schweigen. Grösseren Ausschreibungen, etwa für Untertagarbeiten, legt man heute, in Anlehnung an den Normpositionen-Katalog, meist die Norm SIA 198 zugrunde, die sich unter Art. 456 auch mit Gunit und Spritzbeton befasst [6]. Dieser verlangt eine 28-Tage-Druckfestigkeit von wenigstens 25 N/mm² für einen Spritzbeton, dessen Trockengemisch aus 350 Kilogramm Portlandzement und 1000 Liter Zuschlagstoff «ohne Zusatzmittel» hergestellt ist, was man üblicherweise als Standardmischung bezeichnet. Bei leidlich fachgerechter Verarbeitung entsteht daraus ein Spritzbeton, der einen Wasserzementfaktor zwischen 0,45 und 0,55 aufweist und der je Fest-Kubikmeter etwa 450 Kilogramm Zement enthält. Niemand würde sich damit zufriedengeben, von einem herkömmlichen Beton PC 450 nach vier Wochen eine Mindestfestigkeit von nur 25 N/mm² zu verlangen. Warum begnügt man sich dann beim Spritzbeton damit? Traut man ihm nicht mehr zu, oder kennt man ihn zu wenig? Höchstwahrscheinlich trifft beides zu.

Unbestreitbar unterschätzt man den Spritzbeton vielerorts immer noch. Er begegnet Vorurteilen, Zweifeln und Argwohn, man belächelt ihn gar als «Blätterteig» oder besseren Verputz. Leider kommt dieser schlechte Ruf manchmal nicht von ungefähr. Als nach dem Zweiten Weltkrieg der Aufschwung des Betonspritzens einsetzte, ist oft gesündigt worden, und noch heute schadet mancher Stümper durch sei-

Bild 1. Eingang zur Untertageanlage in Morbio Inferiore (Foto: H. Germond, Lausanne)



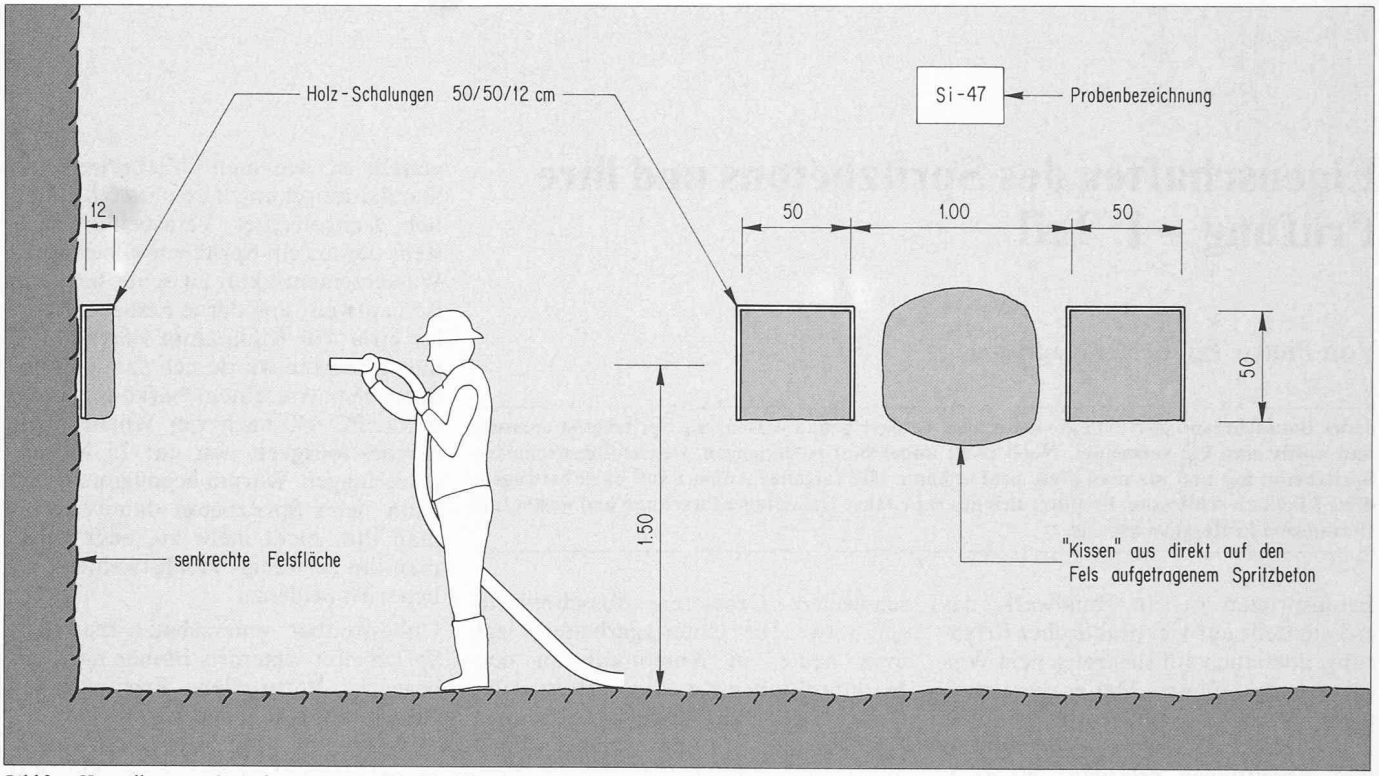


Bild 2. Herstellung von Spritzbetonmustern 50×50×12 cm

ne Pfuscherei dem Ansehen des Verfahrens sehr. Dennoch dürfen vereinzelte Enttäuschungen und Fehlschläge nicht das ganze Verfahren in Verruf bringen. Auch gewöhnlichen Beton wusste man Anno dazumal weniger einwandfrei zu verarbeiten als jetzt, selbst heutzutage passiert noch manches Missgeschick; die sich häufenden Betonschäden sind bekanntlich zu einem guten Teil auf unsorgfältige Arbeit und auf mangelnde Erfahrung zurückzuführen. Kein vernünftiger Mensch würde Beton deswegen als minderwertigen Baustoff schmähen. Warum ist das beim Spritzbeton anders? Weil man ihn zu wenig kennt!

Spritzbeton ist zuwenig bekannt

Schuld daran ist wohl grösstenteils,dass sich Spritzbeton nicht so leicht herstellen und prüfen lässt wie normaler Beton. Wäre die Beschaffung geeigneter Prüfkörper nicht so umständlich und teuer, hätte man Spritzbeton ohne Zweifel häufiger untersucht. Dann wüsste man über das Verfahren besser Bescheid und hätte klare Vorstellungen seiner Möglichkeiten und Grenzen. Dank dessen würde man es nicht nur häufiger und zweckmässiger anwenden, sondern man könnte auch durch eindeutige Qualitätsvorschriften die Spreu vom Weizen scheiden und Misserfolge vermeiden.

Notwendig ist also mehr Wissen um das Betonspritzen. Dazu soll dieser Aufsatz beitragen, der sich ausschliesslich mit dem Trockenspritzverfahren befasst. Seine Erkenntnisse beruhen auf vierzigjähriger Arbeit mit Spritzbeton, seine Materialkennzahlen stützen sich auf insgesamt 3804 einzelne Prüfwerte. Sie sind das Ergebnis routinemässiger Qualitätskontrollen auf Baustellen und, seit 1976, gezielter Untersuchungen bestimmter Fragen im Rahmen jährlicher Grundlagenforschung unter Baustellenbedingungen. In keinem Fall geht es um geschönten Labor-Spritzbeton, der nach Ausschaltung aller störenden Einflüsse unter idealen Bedingungen zu entstehen pflegt. Die folgenden Zahlen sind also keine Spitzenwerte, die man nur unter besonders günstigen Bedingungen erzielen kann; sie gelten vielmehr für jeden fachmännisch und gewissenhaft hergestellten Spritzbeton, einen solchen also, der gelingt, sofern man das Metier beherrscht und sich die nötige Mühe gibt.

Rund 35 Prozent der ausgewerteten Materialprüfungen stammen von Versuchen, die in den letzten acht Jahren grösstenteils im unterirdischen Kalksteinbruch der Tessiner Zementfabrik Saceba in Morbio Inferiore stattgefunden haben (Bilder 1, 2 und 3). Das unterdessen stillgelegte Labyrinth aus Kavernen und Stollen ist gesamthaft über vier Kilometer lang. Es bietet für praxisnahe Versuche denkbar günstige Voraussetzungen, ausserdem konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit, zwei Parameter, die vor allem das Langzeitverhalten von Spritzbeton beeinflussen. Nicht zuletzt sind die sieben seit 1976 durchgeführten Forschungsarbeiten auch durch das bereitwillige Entgegenkommen und die freundliche Zusammenarbeit mit der Eigentümerin gefördert worden. Dafür sei den Verantwortlichen der Saceba SA herzlich gedankt.

Für Spritzbeton gelten zwar grundsätzlich die gleichen betontechnologischen Gesetzmässigkeiten wie für herkömmlichen Beton, doch ergeben sich aus der besonderen Herstellungsweise für die Beschaffenheit und für die Prüfung gewisse Eigenarten [7]. Der bedeutendste Unterschied zu üblichem Beton besteht darin, dass Spritzbeton in einem einzigen Arbeitsgang hergestellt, eingebracht und verdichtet wird. Deshalb gibt es bei ihm keine Frischbetonphase. Klassischer Schalbeton hingegen kann als verarbeitungsbereites Gemisch vor dem Einbringen geprüft werden. Von Spritzbeton lassen sich nur die Bestandteile und das fertige Ergebnis untersuchen; eine Zwischenstufe fehlt. Abgesehen von der gewissenhaften Arbeitsweise sind daher beim Betonspritzen nur die Eignung der Bestandteile - Zuschlagstoffe, Bindemittel, Wasser und gegebenenfalls Zusätze - und die erzielte Qualität entscheidend. «Baubegleitende» Untersuchungen («laufende Kontrolle») überwachen die fachgerechte Herstellung, vorwiegend dienen sie aber dazu, die Eigenschaften des frischen Spritzbetons so früh wie möglich festzustellen, um Fehlentwicklungen rechtzeitig zu verhindern und zu berichtigen.

Eignungsprüfungen

Die Eignungsprüfungen («Vorversuche») des Ausgangsmaterials sind beim Spritzbeton genau gleich und ebenso notwendig wie beim herkömmlichen Beton. Zement und Wasser müssen denselben Anforderungen genügen. Das gilt auch für die Zuschlagstoffe, bei denen ein ausreichender Mehlkornanteil wichtig ist, weil die feinen Bestandteile zusammen mit dem Zement unter anderem die Klebefähigkeit des frischen Spritzbetons verbessern und damit die Rückprallmenge begrenzen. Die Haftung des Spritzbetons an der Auftragsfläche und seine Dichtigkeit hängen ebenfalls vom Mehlkorn ab. Anderseits ist ein gewisser Anteil groben Korns ausser für eine ausgewogene Gefügestruktur auch zur bestmöglichen Verdichtung nötig, letztlich also für die Festigkeit des Spritzbetons. Ausserdem verhindert das Grobkorn, dass sich die Feinbestandteile an den Wandungen der Förderleitung festsetzen. Am häufigsten verwendet man Kiessande mit einem Grösstkorn von etwa zehn Millimeter.

Für Spritzbeton sind runde Zuschlagstoffe geeigneter als gebrochene, weil diese oft weniger fest sind, weil sie ferner wegen ihrer grösseren spezifischen Oberfläche mehr Zement benötigen und weil sie ausserdem den Rückprall erhöhen. Am meisten ins Gewicht fällt allerdings, dass gebrochene Zuschlagstoffe ihrer Scharfkantigkeit wegen die Verschleissteile der Maschine und die Schläuche stärker abnutzen.

Bei Zuschlagstoffen für Spritzbeton kommt es also gleichermassen auf die Kornzusammensetzung wie auf die petrographische Beschaffenheit an. Die beste Kornstruktur und -härte nützt wenig, wenn es an Feinbestandteilen fehlt; anderseits vermag auch eine wohlabgestufte Siebkurve die Festigkeitsminderung beispielsweise eines zu hohen Glimmeranteils nicht wettzumachen.

Es sei beiläufig erwähnt, dass es fast genauso viel (voneinander mehr oder weniger stark abweichende) Siebkurven für Spritzbeton-Zuschlagstoffe gibt wie Spritzbeton-Fachleute, nämlich die Düsenführer und Maschinenfabrikanten, die Betontechnologen und Spezialfirmen. Überlagert man alle diese Sieblinien, entsteht ein erstaunlich breiter Korngrössenbereich, der auch die bei uns bekannten EMPA- und Fullerkurven erfasst.

Zu beachten ist die Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe. Sie muss sich innerhalb verhältnismässig enger Grenzen bewegen: Ist sie zu niedrig, entsteht beim Spritzen zu viel Staub; ausserdem leidet die Vorhydratation des Zementes unter Wassermangel.

Bild 3. Spritzbetonmuster in der Untertageanlage in Morbio Inferiore (Foto: H. Germond, Lausanne

Ist die Eigenfeuchtigkeit hingegen zu hoch, so treten meist rasch Störungen an der Spritzmaschine und in den Schläuchen auf. Überdies kann sich ein ungewollt hoher Wasserzementfaktor mit entsprechenden Qualitätseinbussen ergeben.

Über den Nutzen der Zusätze, bei uns vor allem der Schnellbinder oder Abbindebeschleuniger, sind Fabrikanten und Zwischenhändler einerseits sowie Ausführende und Betontechnologen anderseits oft und von Fall zu Fall geteilter Meinung. Für alle sollte wenigstens eines selbstverständlich sein, nämlich die Eignungsprüfung. Gerade die bei uns vorwiegend verwendeten Abbindebeschleuniger wirken keineswegs mit jedem im Handel erhältlichen Zement auf die erhoffte Weise. In der Schweiz werden etwa 18 verschiedene Zementmarken hergestellt. Obschon es sich ausnahmslos um betontechnologisch gleichwertige Portlandzemente handelt, weisen sie zufolge unterschiedlicher Rohstoffe und Herstellungsweisen geringfügige «individuelle» Unterschiede auf. Es liegt auf der Hand, dass die nach einem Standardrezept produzierten Schnellbinder nicht auf jeden Zement gleich reagieren. Anderseits genügen beim Abbindebeschleuniger meist nur geringfügige Korrekturen an der Zusammensetzung, um ihn auf einen bestimmten Zement «einzustellen». Das ist den Herstellern in der Regel bekannt, so dass sie für jeden Zement ohne Mühe den richtigen Schnellbinder liefern können.

Ganz und gar unerlässlich sind Verträglichkeitsprüfungen, wenn man zwei oder mehr Zusatzmittel zugleich verwenden will, beispielsweise einen Schnellbinder und einen Staubverminderer.

Prüfkörper

Zur Prüfung der Eigenschaften des fertigen Spritzbetons («Nachprüfung», «Schlussprüfung») sind zweckdienliche Probekörper nötig. Sie müssen entweder dem zu untersuchenden Spritzbeton entstammen oder möglichst gleich entstanden sein. Früher spritzte man zu diesem Zweck den Beton senkrecht von oben nach unten in Holzschalungen oder konische Formen aus Drahtnetz (durch deren Maschen der Rückprall und die Spritzluft entweichen konnten [8]). Oft hat man auch den frischen Spritzbeton von der Auftragsfläche gekratzt und in die üblichen Prüfkörper-Formen gestampft. Es ist klar, dass solche Muster anders entstehen als der zu untersuchende Spritzbeton, weshalb sie sich zu dessen Prüfung nicht eignen.

Völlig unverfälschte Auskunft über die Eigenschaften des fertigen Spritzbetons liefern nur dem Bauwerk entnommene Versuchskörper («Bauwerksproben»). Am raschesten und billigsten erhältlich sind Bohrkerne von 50 Millimeter Durchmesser, sogenannte Kleinbohrkerne (Bild 4). Transport und Handhabung des Kernbohrgerätes sind verhältnismässig leicht und einfach (Bild 5). Das Kernbohren hat den zusätzlichen Vorteil, dass es nicht nur völlig ungestörte Betonproben liefert, sondern auch die Entnahmestelle (abgesehen von den verbleibenden Löchern) nicht beeinträchtigt. Andere, vorwiegend früher gebräuchliche Gewinnungsmethoden wie Spitzen, Brechen und Sägen hinterlassen naturgemäss gröbere Spuren. Überdies ist manchmal nicht auszuschliessen, dass der entnommene Probekörper selbst darunter leidet.

Wo man dem fertigen Spritzbeton keine Muster entnehmen kann (etwa weil

Bild 4. Spritzbeton-Kleinbohrkerne (50 mm Durchmesser)

Bild 5. Entnahme von Spritzbetonbohrkernen (Foto: H. Germond, Lausanne)

seine Stärke dafür nicht ausreicht oder weil das Bauwerk nicht mehr zugänglich ist), sollen die Probekörper die Eigenschaften des zu untersuchenden Spritzbetons trotzdem möglichst getreu widerspiegeln. Hierfür verwendet man Holzschalungen, die in der Regel 50×50 Zentimeter messen und zwölf Zentimeter tief sind. Man befestigt sie an der Auftragsfläche des Spritzbetons, also beispielsweise am Widerlagerbereich oder im Gewölbe eines Stollens (Bild 3), so dass der Spritzbeton dieser Schalungen genau gleich entsteht wie der übrige: also mit dem gleichen Trockengemisch, mit denselben maschinellen Einrichtungen, durch denselben Düsenführer, mit demselben Spritzdruck, in der gleichen Spritzrichtung und so weiter. Nachdem diese Musterstücke (Bild 6) auch in der gleichen Weise nachbehandelt worden sind, entnimmt man ihrem Kernbereich die gewünschten Probekörper. Deren Untersuchung liefert in der Regel schlüssige Ergebnisse für die Beschaffenheit des zu untersuchenden Spritzbetons. Allerdings ist zu bedenken, dass die Herstellung solcher Prüfkörper – unbewusst oder absichtlich – durch das Wissen um ihren Verwendungszweck mehr oder weniger stark beeinflusst wird. Von solcher Hypothek gänzlich frei sind allein Bohrkerne, die man dem fertigen Spritzbeton an willkürlich gewählten Stellen entnimmt.

«Kern der Wahrheit»

Der Bohrkern aus dem Bauwerk liefert eine Fülle von Aufschlüssen, er ist gewissermassen der Steckbrief des Spritzbetons, im wahrsten Sinne des Wortes «Kern der Wahrheit». Vielsagend ist schon, wo der Kern beim Herausbohren abbricht. Daraus kann man auf die Festigkeit sowie auf die Haftung an der Auftragsfläche und zwischen den einzelnen Schichten schliessen. Hat man es mit dem gefürchteten «Blätterteig» zu tun, zerfällt der Kern meist schon beim Bohren in Scheiben. Andernfalls offenbart sich solch schwerwiegender Mangel spätestens, wenn man den Kern in der Hand hält. Dann sieht man auch weniger Schlimmes. Grösse, Zahl, Form und Verteilung der Lufteinschlüsse, Lunkern und sichtbaren Poren sind Anhaltspunkte für die Festigkeit des Spritzbetons. Die Dichtigkeit lässt sich daran abschätzen, wie rasch der trockene Bohrkern Wasser aufsaugt. Wie ein offenes Buch verrät er auch einiges über das Können und die Gewissenhaftigkeit des Düsenführers. Man sieht, wie dick und wie gleichmässig er die einzelnen Schichten aufgespritzt hat; erkennbar ist auch, wie sorgfältig gesäubert, gewaschen und nachbehandelt worden ist. Dabei gilt die Faustregel: je undeutlicher die Schichtung, desto besser. Es gibt übrigens einen einfachen Trick, um den Schichtenverlauf klar zu erkennen: man taucht den Bohrkern ins Wasser und verfolgt sein allmähliches Trocknen. Von jeder Schichtbreite sind die ersten Millimeter besonders zementreich und deshalb dichter als der Rest. Sie bleiben länger feucht und zeichnen sich als dunkle Streifen ab.

Bild 6. Spritzbetonmuster 50×50×12 cm

An Bohrkernen von 50 Millimeter Durchmesser lassen sich die geläufigsten Güteprüfungen vornehmen. Man kann daran das Gefüge analysieren und die Sättigungswerte bestimmen, ebenso die Druck-, Zug- und Haftfestigkeit sowie die Durchlässigkeit (Permeabilität). Bezüglich der Druckfestigkeit hat die Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) festgestellt, dass der Mittelwert von fünf bis sechs Kleinbohrkernen demjenigen eines Würfels von zwanzig Zentimeter Kantenlänge entspricht (sofern das Grösstkorn der Zuschlagstoffe 32 Millimeter nicht überschreitet). Aus Kleinbohrkernen fertigt man auch die Probekörper zur Untersuchung der Frostbeständigkeit an. Es gibt nur wenige, seltenere Materialprüfungen, für die sich solche Bohrkerne nicht eignen.

Soweit nicht anders erwähnt, sind alle in diesem Aufsatz genannten Materialkennwerte an Kleinbohrkernen be-

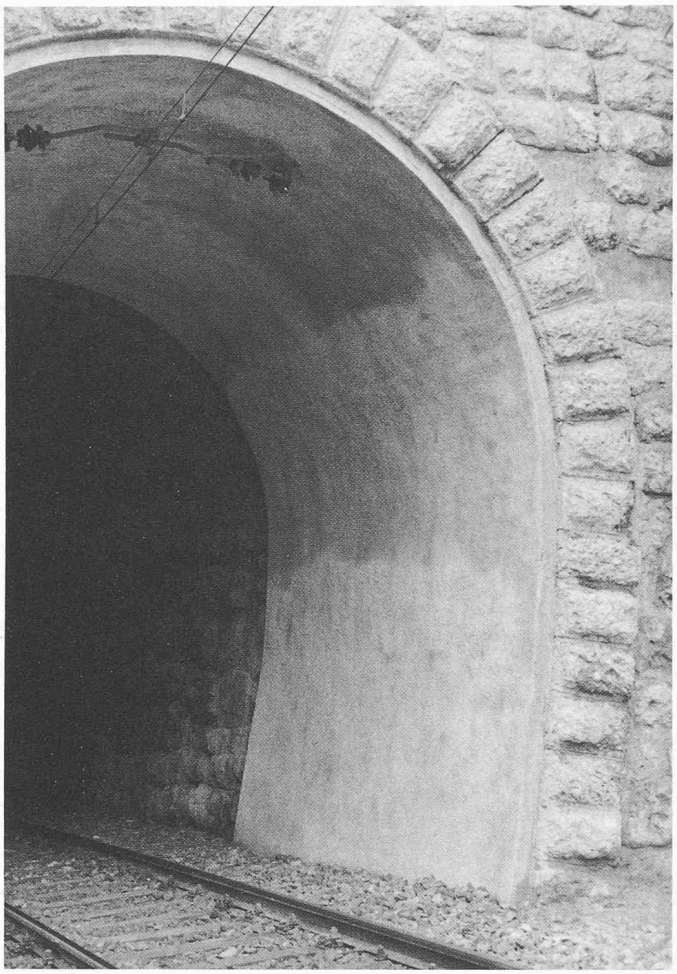


Bild 7. Unterschiedlicher Grauton («Wolkung») nacheinander ausgeführter Spritzbetonflächen

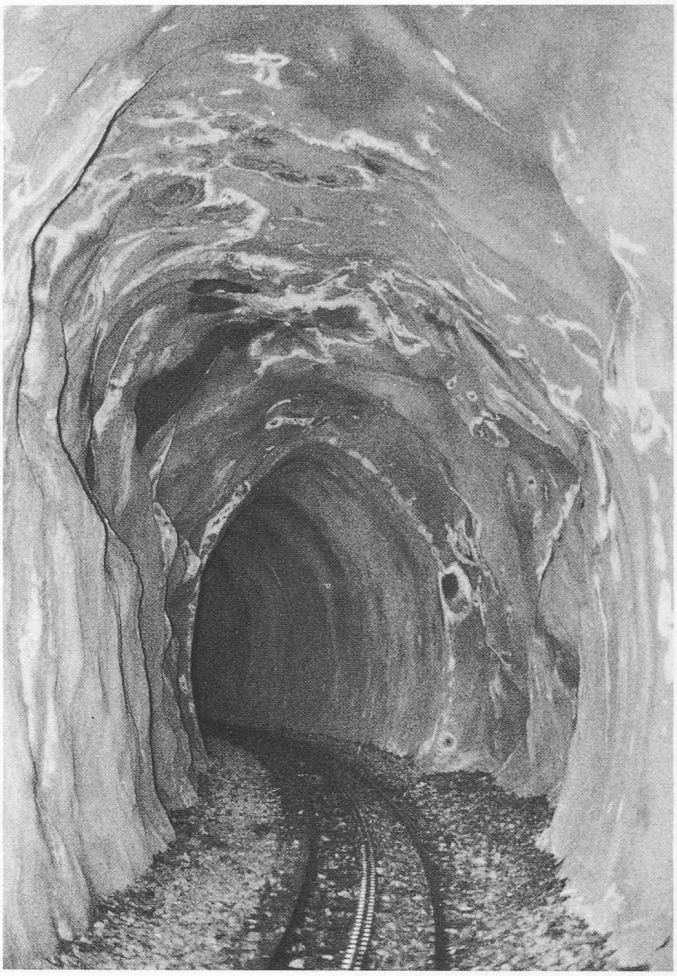


Bild 8. Weisse Flächen als Folge übermässigen Schnellbindergebrauchs

stimmt worden und betreffen Spritzbeton aus der Standardmischung («Standardspritzbeton») ohne Schnellbinder.

Die Liegezeit

Die Eigenschaften des Spritzbetons werden bekanntlich von einer Vielzahl untereinander abhängiger Gegebenheiten beeinflusst. Die wichtigsten davon sind die Zusammensetzung des Trokkengemisches, der Wasserzementfaktor, die Erfahrung des Düsenführers, die Aufprallgeschwindigkeit des Spritzgutes, die Struktur und Neigung der Auftragsfläche und die Nachbehandlung.

Es gehört nicht zum Gegenstand dieses Aufsatzes, die Bedeutung und die gegenseitigen Beziehungen der genannten Faktoren zu erörtern. Das ist anderswo bereits ausführlich geschehen [1, 2, 3, 4, 5]. Hier sei nur auf eine einzige Einflussgrösse eingegangen, nämlich die Liegezeit des Trockengemisches. Das ist die Zeitspanne, welche zwischen der Aufbereitung des Trockengemisches und seiner Verarbeitung verstreicht. Die Liegezeit ist vor allem bei Untertagebauten mit ihren oft langen und umständlichen Transportwegen fast immer im Spiel. Dennoch ist sie bisher kaum gebührend beachtet worden. Schon oft hat man die Schuld an undichtem oder bröckelndem Spritzbeton überall gesucht, nur nicht bei überdehnten Liegezeiten. Mochte das Trokkengemisch schon am frühen Morgen aufbereitet und erst gegen Abend verspritzt worden sein, es war ja Trockengemisch, also trockenes Gemisch; was sollte da schon passieren? Bedenkt man, dass der für das Trockengemisch verwendete Kiessand immerhin etwa drei bis sechs Gewichtsprozent Wasser als sogenannte Eigenfeuchtigkeit enthält, kann man sich gut vorstellen, was während der Liegezeit vor sich geht. Sofort nach dem Vermischen beginnt der Zement auf das Wasser im Kiessand zu reagieren. Zuerst hydratisieren die feinsten Zementkörner, jene mit einem Durchmesser zwischen fünf und zehn Mikrometer, während sich um die grösseren Zementkörner ein Ettringit-Mantel bildet. Ist das gesamte Wasser des Kiessandes aufgebraucht, kommt der Hydratationsvorgang zum Stillstand. Überschreitet nun die Liegezeit eine gewisse Dauer, sind die feinen Zementkörner bereits vollständig hydratisiert, also chemisch inert, das heisst ohne jede Bindekraft. Wenn das Trockengemisch endlich verspritzt wird, reagieren auf das an der Düse beigefügte Zugabewasser nur noch die grösseren Zementkörner. Das hat für die Eigenschaften des Spritzbetons Folgen: Beeinträchtigt werden vorwiegend die Druck-, Zug- und Haftfestigkeit, aber es leiden auch die Permeabilität und die Frostbeständigkeit [9]. Die Zeitgrenze, jenseits welcher solche schädlichen Auswirkungen eintreten, hängt hauptsächlich vom Zementgehalt und von der Eigenfeuchtigkeit des Trockengemisches ab. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass diese Grenze bei etwa drei bis vier Stunden Liegezeit liegt. Gezielte Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet unternimmt derzeit das Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

Das Aussehen

Die Farbe sauberen Spritzbetons wird durch den Zement und die Zuschlagstoffe bestimmt. Die Oberfläche ist in der Regel mehr oder weniger betongrau und spritzrauh. Schwankungen des Grautones, die sogenannte «Wolkung», sind auf geringfügige Unterschiede der Anmachwassermenge zurückzuführen

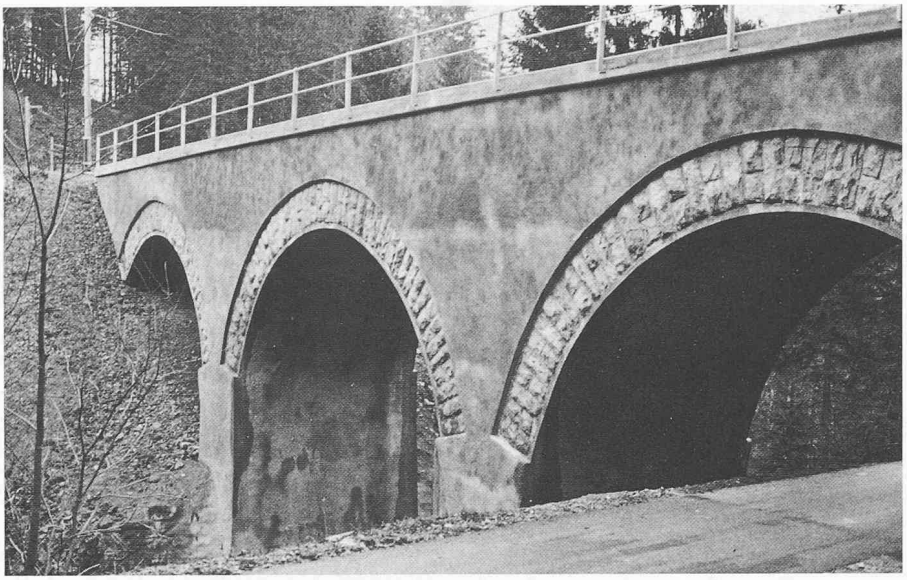


Bild 9. Durch eine verunreinigte Spritzdüse verursachte Fleckung («Leopardenfell»)

und treten unvermeidlicherweise vorwiegend bei Spritzbetonflächen auf, die in zeitlichen Abständen hergestellt worden sind (Bild 7). Verschieden ausgedehnte helle bis schneeweisse Flächen, welche die Spritzbetonoberfläche manchmal verunzieren (Bild 8), sind meist auf ein Übermass an Schnellbinder zurückzuführen. Häufig zeigt der Spritzbeton auch ein Muster dunkler Flecken, das sogenannte «Leopardenfell» (Bild 9). Schuld daran ist die Nachlässigkeit des Düsenführers, wenn er nicht bemerkt, dass seine Düse verunreinigt ist und deshalb das Spritzgut nicht gleichmässig benetzt wird. Das bewirkt die eigenartige Fleckung.

Die Oberflächenrauheit hängt hauptsächlich von der granulometrischen Beschaffenheit der Zuschlagstoffe ab, vor allem von ihrem Grösstkorn (Bild 10). Der Gesamteindruck einer Spritzbetonoberfläche wird weitgehend vom Können des Düsenführers geprägt. War ein erfahrener Mann am Werk, weist der Spritzbeton überall ein gleichmässiges Aussehen und eine einheitliche Oberflächenstruktur auf (Bild 11). Auffällige Wolkung, viele Flecken und schwankende Rauhigkeit, Höcker und «Überzähne», abgesackte Flächen und knapp überdeckte Armierungsdrähte zeugen von unsachgemässer Handhabung der Düse (Bilder 12 bis 14). Oft sind es nicht nur rein äusserliche Schönheitsfehler, sondern sichtbare Zeichen tiefersitzender Mängel.

Das Spritzgut trifft mit grosser Wucht auf die Auftragsfläche (Untergrund). Dadurch wird der Leim aus Zement und Mehlkorn in die Unebenheiten, Poren und Risse des Untergrundes gepresst. Sobald das Bindemittel erhärtet, verbindet sich der Spritzbeton innig mit seiner Auftragsfläche, sofern diese genügend fest, rauh und sauber ist. Die Haftfestigkeit des Spritzbetons hängt also von der Beschaffenheit der Auftragsfläche ab. Je glatter, mürber und schmutziger der Untergrund, desto schlechter haftet der Spritzbeton.

Die Haftung

Aus dieser Faustregel ergeben sich Anhaltspunkte für die Haftung an verschiedenen Materialien. Praktisch sind Beton und Fels die häufigsten Auftragsflächen, weshalb ihre Verbindung mit Spritzbeton schon öfter untersucht worden ist, und zwar mit Abreissversuchen und Haftzugprüfungen. Beim Abreissversuch zieht man ein ringsum freigelegtes Stück Spritzbeton von der Auftragsfläche weg. Da die Abreisskraft oft nur ungenau auf das Zentrum des Prüfkörpers wirkt, treten vielfach Biegemomente auf, welche das Versuchsergebnis verfälschen [10]. Diese Gefahr besteht bei der Haftzugprüfung nicht. Hierfür verwendet man Bohrkerne, meist von 50 Millimeter Durchmesser, auf deren planparallel abgelängten Enden man Metallkappen klebt, die mit genau zentrisch angeordneten Ösen für die Zugvorrichtung versehen sind. Diese wirkt beidseitig über ein Kardangelenk, weshalb beim Zugversuch keine Biegemomente auftreten können (Bild 15).

Meist erhält man schon beim Herausbohren der Probekörper Aufschluss

Bild 10. Oberflächenrauheit von Spritzbeton

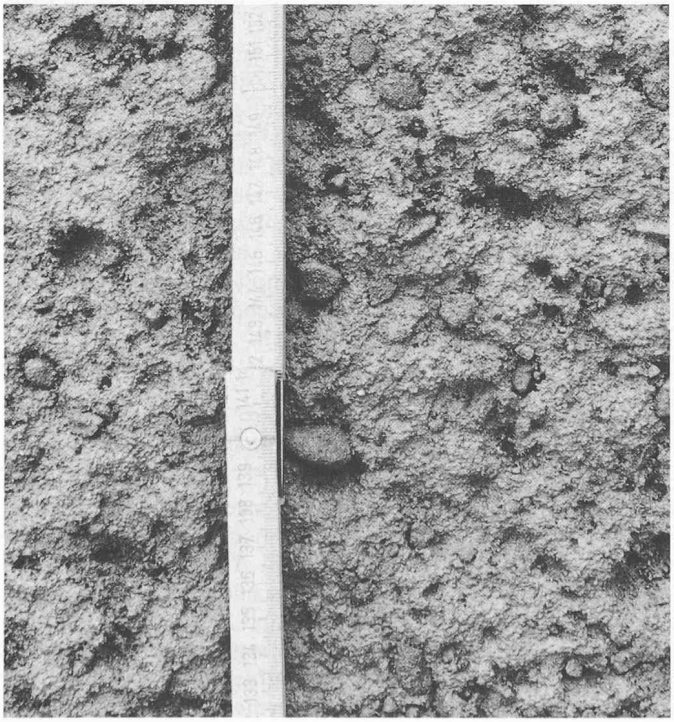


Bild 11. Sorgfältig hergestellte Spritzbetonfläche (Foto: O. Pfeifer, Luzern)

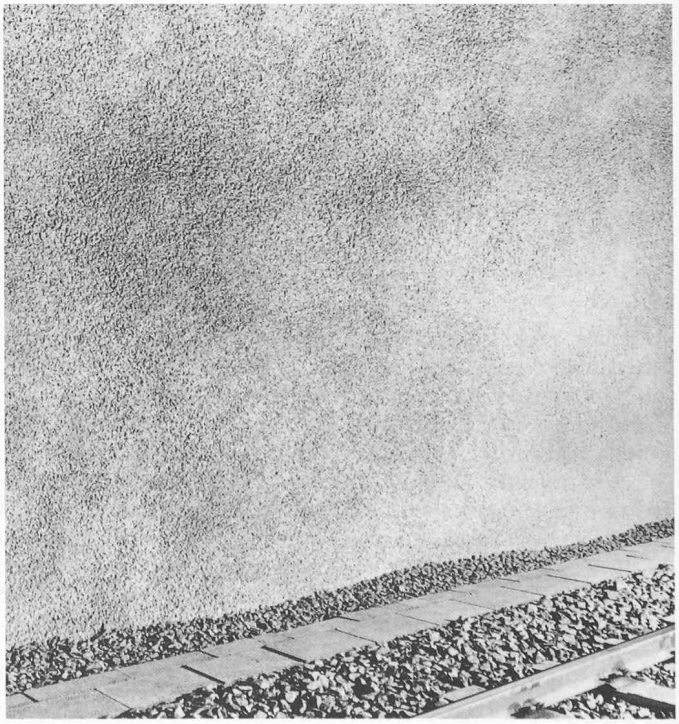


Bild 12. Unansehnliche Spritzbetonoberfläche («Überzähne»)

Bild 13. Unregelmässige Spritzbetonoberfläche (schwankende Rauheit)

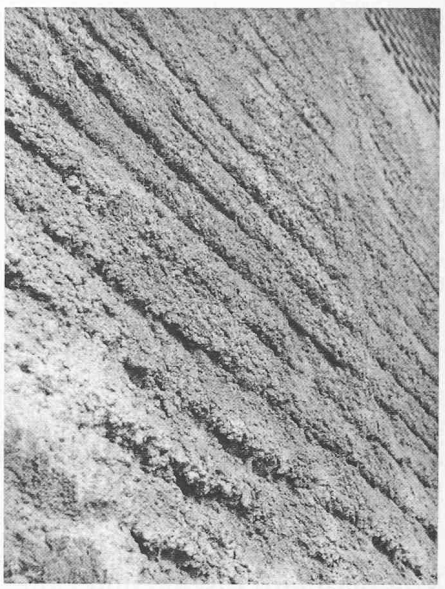
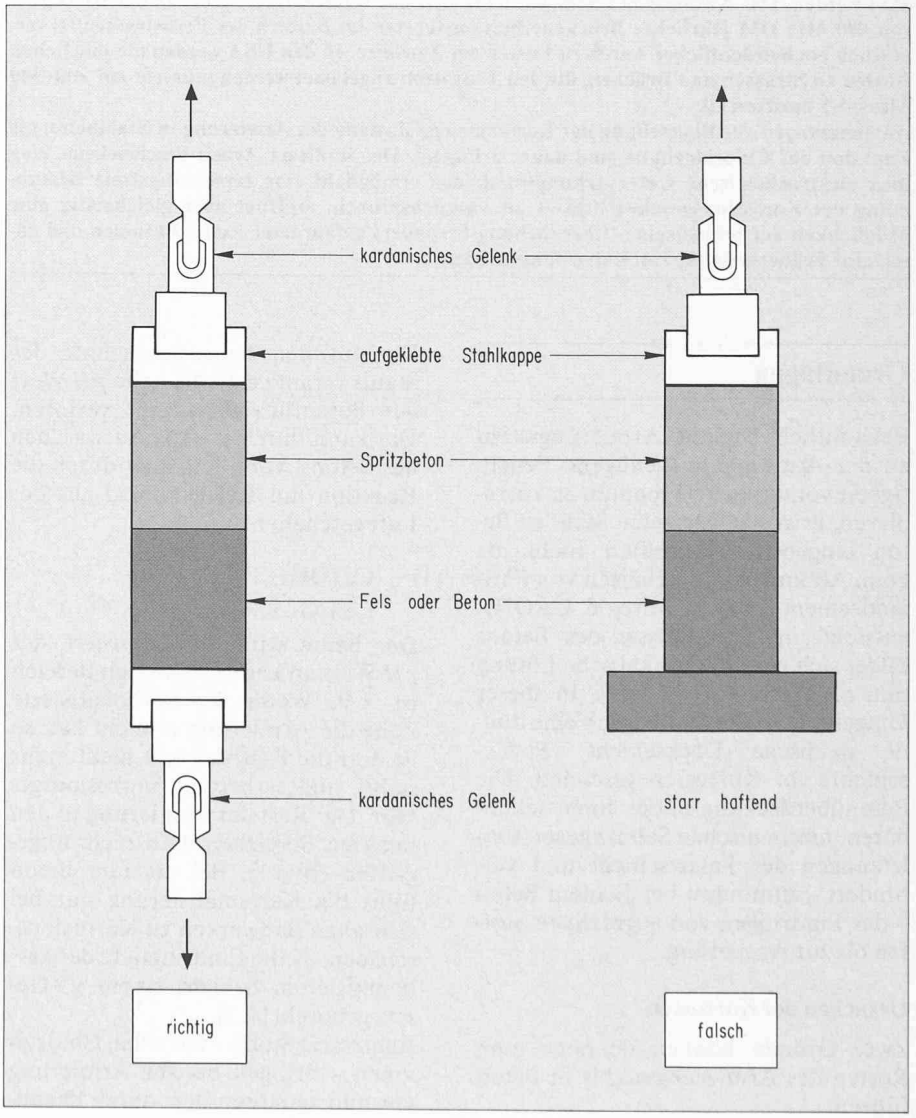


Bild 14. Mit Spritzbeton ungenügend überdeckte Armierungsdrähte

über die Haftverhältnisse. Brechen die Bohrkerne an der Auftragsfläche ab, ist es mit dem Verbund im allgemeinen nicht weit her. Unzureichende Haftung zwischen dem Spritzbeton und seiner Auftragsfläche oder zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten sind ein häufiges Übel. Meist setzt sich die Gesamtstärke ja aus mehreren, nacheinander aufgetragenen Einzelschichten zusammen. Bei fachgemässem Vorgehen verleiht dieser Aufbau dem Spritzbeton seine niedrige Permeabilität und hohe Frostbeständigkeit. Schludrige Arbeit hingegen macht diesen Vorzug zum Nachteil. Unachtsamkeit und fehlerhafte Spritztechnik führen zu Rückpralleinschlüssen und zum Auftrag übermässig dicker Schichten, die sich von der Auftragsfläche lösen - anstatt eines monolithischen Ganzen entsteht der berüchtigte «Blätterteig». Diesem schwerwiegenden Mangel kommt man auf die Spur, indem man den Spritzbeton mit dem Hammer systematisch abklopft. Hohlstellen unter der Oberfläche ergeben dabei einen charakteristischen Ton, sie «klingen hohl». Dies gilt gleichermassen für Hohlstellen zwischen den Spritzbetonschichten, zwischen Spritzbeton und Auftragsfläche sowie (bis zu einer gewissen Tiefe) im Untergrund. In Zweifelsfällen legt man eine Hand auf: Sie spürt bei einiger Erfahrung die Schwingungen, welche der Hammerschlag auch bei feinsten Klaffungen zwischen den Schichten hervorruft.

Spritzbeton haftet an verschiedenen Auftragsflächen unterschiedlich. Wichtig ist vor allem sein Verbund mit Beton und Fels. Die Verbindung zwischen zweckmässig vorbehandeltem Beton und Spritzbeton ist in der Regel stärker als die Zugfestigkeit des Betons. Die Haftung zwischen Spritzbeton und Fels hängt von der Festigkeit und Beschaffenheit des Gesteins ab. Oftmals ist die Zugfestigkeit des Felsen geringer als jene des Spritzbetons. Massgebend für das Zusammenwirken von Spritzbeton und sauberem Fels ist jedoch nicht nur die auf wenigen Zentimetern gemessene Haftfestigkeit, sondern auch die grossflächige Verzahnung mit den Unebenheiten der Felsoberfläche. Die folgenden Messwerte sind durch Haftzugprüfungen an Kleinbohrkernen ermit-

Bild 15. Apparatur zur Bestimmung der Haft- und Zugfestigkeit



telt worden (in Klammern die Zahl der Messwerte und das Alter der Probekörper):

Sandgestrahlter Beton
(32 Stück, 29–45 Tage) 0,7–3,3 N/mm²
(46 Stück, 180 Tage) 0,5–3,5 N/mm²

Schalungsroher Beton
(29 Stück, 6,5 Jahre) 1,1–6,3 N/mm²

Sandstein
(5 Stück, 28 Tage) 0,2 N/mm²

Kalkstein der Breggia-Schlucht
(9 Stück, 34 Tage) 0,6–1,1 N/mm²
(6 Stück, 78 Tage) 0,6–1,2 N/mm²

Zweiglimmergneis
(14 Stück, 30 Tage) 0,9–1,8 N/mm²

Rotondo-Granit
(4 Stück, 30 Tage) 0,1–0,4 N/mm²
(1 Stück, 2 Jahre) > 1,5 N/mm²

Granitgneis
(5 Stück, 1,5 Jahre) > 1 N/mm²

Biotit-Plagioklasgneis
(19 Stück, 2–3 Jahre) 0,5–2,0 N/mm²

Adresse des Verfassers: *P. Teichert*, E. Laich SA, 6671 Avegno.

Der zweite Teil dieses Beitrages folgt in Heft Nr. 16

Elektrochemische Untersuchung der Korrosion von Armierungsstahl in Beton

Von Bernhard Elsener und Hans Böhni, Zürich

Die ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit von Stahl in Beton ist seit mehr als hundert Jahren bekannt. Sie beruht auf einer dünnen oxidischen Schutzschicht, der Passivschicht, die der Stahl im stark alkalischen Milieu des Porenwassers im abgebundenen Zement bildet. Die Betonüberdeckung ist für den Korrosionsschutz der Armierung insofern von Bedeutung, als sie das Eindringen aggressiver Stoffe verhindern soll. Korrosionsschäden an der Armierung werden durch Alterung (Karbonatisierung) des Betons und/oder durch Chlorideinfluss hervorgerufen. Währenddem Abbindebeschleuniger heute keine Chloride mehr enthalten sollten, lässt der riesige Einsatz von Streusalz für den Winterdienst das Problem der Korrosion der Armierung – nicht erst seit den spektakulär bekanntgewordenen Schadensfällen – akut werden. Das Ausmass der Schäden lässt sich nur schwer abschätzen. In der BRD geht von 400 Mio DM jährlicher Brückenerhaltungskosten im Bereich der Fernstrassen [1] vermutlich ein beträchtlicher Anteil zu Lasten der Tausalze. In den USA werden die jährlichen Kosten an Strassen und Brücken, die den Tausalzen angelastet werden müssen, auf 200–500 Mio US $ beziffert [2].
Anstrengungen zur Beurteilung der Korrosionsgefährdung der Armierung in Stahlbeton als Funktion des Chloridgehalts sind daher dringend. Der in dieser Arbeit beschriebene Weg über elektrochemische Untersuchungsmethoden ermöglicht eine zerstörungsfreie Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit an Versuchsproben, eröffnet aber gleichzeitig eine Möglichkeit zur periodischen Überwachung besonders gefährdeter Konstruktionen und damit eine Früherkennung von Korrosionsschäden.

Grundlagen

Bekanntlich beginnt Armierungsstahl an der Atmosphäre (genügend Feuchtigkeit vorausgesetzt) spontan zu korrodieren, er rostet. Derselbe Stahl in Beton eingebettet korrodiert nicht, da beim Abbinden und Erhärten von Portlandzement Kalziumhydroxid, $Ca(OH)_2$ entsteht, im Porenwasser des Betons bildet sich eine stark alkalische Lösung mit *pH*-Werten > 12,5 [3]. In dieser Umgebung ist der Stahl durch eine dünne oxidische Deckschicht (Passivschicht) vor Korrosion geschützt. Die Betonüberdeckung bildet einen sekundären, mechanischen Schutz gegen Verletzungen der Passivschicht und verhindert – zumindest bei dichtem Beton – das Eindringen von aggressiven Stoffen bis zur Armierung.

Ursachen der Korrosion

Zwei Gründe können dennoch zum Rosten des Armierungsstahls in Beton führen:

- Der für den Korrosionsschutz des Stahls verantwortliche hohe *pH*-Wert der Porenflüssigkeit geht verloren. Das kann durch starkes Auswaschen des Betons, vor allem aber durch die Reaktion mit Kohlendioxid aus der Luft geschehen:

(1) $Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O$

Der Beton wird *karbonatisiert*, der *pH*-Wert im karbonatisierten Bereich ist < 9. Wenn die karbonatisierte Zone die Armierung erreicht hat, so ist dort die Passivschicht nicht mehr stabil, und es besteht Korrosionsgefahr. Der Rest der Armierung in den intakten Bereichen wird nicht angegriffen (Bild 1). Bei dichtem Beton führt die Karbonatisierung nur bei sehr alten Bauwerken zu Korrosionsschäden, da die Eindringtiefe der karbonatisierten Schicht einem $\sqrt{t}$-Gesetz gehorcht [4, 5].

- Aggressive Stoffe – vor allem Chloridionen – dringen bis zur Armierung vor und zerstören dort durch chemischen Angriff die Passivschicht *auch bei hohen pH-Werten*. Die Auflösung des Stahls erfolgt dann nur an solchen Stellen. Die Chloridionen können dabei von Zusatzmitteln, aus Zuschlagsmaterialien, vom Anmachwasser usw. stammen, mehrheitlich werden sie jedoch aus der Umgebung (Streusalzeinsatz) in den Beton gelangen.

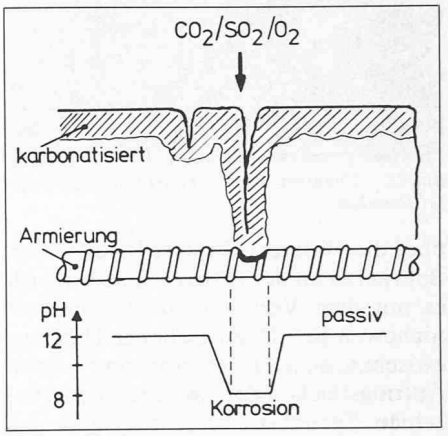


Bild 1. Lokale Korrosion des Armierungsstahls als Folge der pH-Absenkung in teilweise karbonatisiertem Beton

Der Zeitpunkt, in dem die Korrosion einsetzt, hängt wesentlich von der Dikke und der Qualität der Betonüberdekkung und von der Chloridkonzentration an der Oberfläche ab. Risse und Poren erleichtern die Karbonatisierung und das Eindringen der Chloridionen und verkürzen somit die Zeit bis zum Auftreten von Korrosionsschäden.

Mechanismus der Korrosion

Die Korrosion von Stahl im Beton ist ein elektrochemischer Vorgang, in dem der feuchte Beton den Elektrolyten bildet. Die Auflösung des Armierungsstahls kann durch die elektrochemische Reaktion

(2) $Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ **Anode**

dargestellt werden, d. h. ein Eisen*atom* an der Stahloberfläche wird in ein Metall*ion* überführt, das gelöst oder als feste Verbindung (z.B. Oxid) vorliegen kann. Die freiwerdenden Elektronen