

Zehn Jahre Grundlagenforschung im Kleinen Ten Years Of Basic Research On A Small Scale

Ing. Pietro Teichert, E. Laich SA, Avegno, Schweiz

Die Firma E. Laich SA befaßt sich als einziges Unternehmen der Schweiz seit über vierzig Jahren ausschließlich mit Spritzbeton. Durch systematische Güteprüfungen und mit gezielten Untersuchungen hat sie eine Fülle von Materialkennzahlen erarbeitet, unter anderem für die Dichtigkeit, die Porenstruktur und die Frostbeständigkeit von Spritzbeton.

Abgesehen von drei Forschungsarbeiten gemeinsam mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, hat die Laich SA seit 1976 zehn kleinere Vorhaben durchgeführt. Damit sind unter anderem Trockengemischrezepturen gefunden worden, die es ermöglichen, bestimmte Anforderungen an den Spritzbeton zu erfüllen, beispielsweise bezüglich der Frostbeständigkeit oder des Verbundes mit Beton.

Weitere Untersuchungen galten der Verfeinerung von Arbeitstechniken und der Qualitätssicherung, hauptsächlich beim Sanieren schadhafter Bauwerke aus Mauerwerk und Beton.

Schließlich hat man Erklärungen für gewisse Eigenarten des Betonspritzens gefunden, dank denen sich das Verfahren zweckmäßiger anwenden läßt.

E. Laich SA, the only company in Switzerland specializing exclusively in shotcrete, has been at it for over forty years. With systematic quality testing and special investigations the company has compiled a wealth of data on material properties, such as shotcrete's density, pore structure and frost resistance.

Besides three research programmes carried out jointly with the Federal Institute of Technology in Zurich, Laich has conducted ten more modest projects of its own since 1976. One noteworthy result was the discovery of dry mix formulas that make it possible to "tailor" the shotcrete to specific needs, such as high frost resistance or excellent adhesion to concrete. Other projects were aimed at refining work practices and at improving quality assurance, notably in the renovation of damaged masonry and concrete structures.

Explanations were also found for certain peculiarities of shotcreting, thus improving the effectiveness of the process.

Die Erkenntnisse, über die hier teilweise berichtet wird, 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 Ergebnisse sind also keine Spitzenwerte, die nur unter besonders günstigen Umständen gelängen; 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 die Hälfte der ausgewerteten Materialprüfungen stammen von Versuchen, die in den letzten zehn Jahren größtenteils im unterirdischen Kalksteinbruch der Tessiner Zementfabrik Saceba in Morbio Inferiore bei Chiasso stattgefunden haben. 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.

Nahezu alle erarbeiteten Materialkennzahlen sind an Bohrkernen von 50 Millimeter Durchmesser bestimmt worden.

Wo nicht anders vermerkt, ist von sogenanntem "Standard-Spritzbeton" die Rede. Das ist im Trockenspritzverfahren hergestellter Spritzbeton, dessen Ausgangsmischung sich aus 350 Kilogramm Portland-Zement und 1.000 Liter erdfechter, 0 - 10 Millimeter messender Zuschlagstoffe guter granulometrischer und petrographischer Beschaffenheit zusammensetzt ("Standardmischung"). Wegen Rückpralles und Verdichtung entsteht daraus ein Spritzbeton, der je Festkubikmeter ungefähr 450 Kilogramm Zement enthält.

Erhärteter Spritzbeton besteht aus Zuschlagstoffen, Zementstein und mehr oder weniger hydratisiertem Zement sowie Poren. Diese unterteilt man in Gesteinsporen der Zuschlagstoffe, in Gelporen des Zementsteines ("Gelporosität"), in Makroporen ("Makroporosität") aus etwaigen Lufteinschlüssen und Verarbeitungsfehlern sowie in Kapillarporen ("Kapillarporosität"), die bei der Hydratation des Zementes entstehen. Alle Poren zusammen ergeben die sogenannte Gesamtporosität.

Man bestimmt die Kapillarporosität, zu welcher man auch die Gelporosität rechnet, indem man einen zuvor bei 105 bis 110 Grad Celsius getrockneten Prüfkörper (meist ein Bohrkern von 50 Millimeter Durchmesser) wenige Millimeter tief ins Wasser stellt. Die Kapillarität bewirkt, daß sich der Prüfkörper vollsaugt. Sobald die regelmäßigen Wägungen zeigen, daß keine Gewichtszunahme mehr erfolgt und somit die "Gewichtskonstanz" erreicht ist, ergibt sich aus der "Kapillarwasseraufnahme" das Volumen der Kapillarporen.

Mit einer zweiten Messung ermittelt man die

Gesamtporosität. Hierfür wird dem wiederum ofentrockenen Prüfkörper im Vakuum sämtliche Luft entzogen, er wird "evakuiert". In diesem Zustand gibt man Wasser zu, das die unter Vakuum stehenden Poren füllt. Aus dem Gewicht der aufgenommenen Wassermenge erhält man das Volumen aller Poren. Zieht man davon die zuvor bestimmte Kapillarporosität ab, bleibt das Volumen jener Poren übrig, die durch das natürliche Kapillarsaugvermögen nicht gefüllt werden. Dieses Porenvolumen entspricht bei guter Betonqualität weitgehend der Makroporosität. Die Kapillar-, die Makro- und die Gesamtporosität bezeichnet man als "Sättigungskennwerte":

Spritzbeton Sättigungskennwerte (28 d)	Volumenprozent				
	\bar{x}	s	v	max.	min.
Kapillarporosität (n = 143)	17.6	2.6	14.5	24.1	10.4
Makroporosität (n = 140)	4.3	1.7	39.5	9.6	0.4
Gesamtporosität (n = 158)	21.6	2.7	12.6	30.1	14.6

Im Alter von 28 Tagen besteht Spritzbeton durchschnittlich zu einem Fünftel aus Hohlräumen. Dennoch ist er erstaunlicherweise sehr dicht (oder, anders gesagt, sehr wenig durchlässig). Das ist auf die besondere Struktur der Hohlräume zurückzuführen, vor allem auf diejenige der Kapillarporen, die ja den größten Teil des Hohlraumvolumens ausmachen. Das ist durch die besondere Herstellungsweise des Spritzbetons zu erklären, was sich am besten durch einen Vergleich mit herkömmlichem Beton verdeutlichen läßt. Dieser wird in der Regel auf die ganze Bauteildicke in einem Mal eingebracht und verdichtet. Infolgedessen entstehen durchgehende Kapillaren. Bei Spritzbeton ist es anders. Sofern man fachgerecht arbeitet, setzt er sich aus etwa zwei bis drei Zentimeter starken Einzelschichten zusammen, die man in Abständen von wenigstens 24 Stunden aufträgt. Dadurch kann jede Schicht für sich weitgehend schwinden, und jede neue Schicht überdeckt die Schwindrisse der vorhergehenden, so daß Spritzbeton fast keine durchgehenden Kapillaren aufweist. Deswegen ist die Durchlässigkeit des Spritzbetons so gering. Das erklärt aber auch, warum es unsinnig ist, Spritzbeton mehr als zwei bis drei Zentimeter dick auf einmal aufzutragen, womöglich noch unter Beigabe von Schnellbinder. Dadurch verliert der Spritzbeton einen seiner wertvollsten Vorzüge. Wie dicht fachgerecht hergestellter Spritzbeton ist, geht aus der folgenden Zusammenstellung hervor:

Spritzbeton	
Durchlässigkeit nach Darcy (28 d)	
$\bar{x}_{(n = 1'101)}$	$= 12.73 \cdot 10^{-10} \text{ m/sec}$
$s_{(n = 1'101)}$	$= 7.02 \cdot 10^{-10} \text{ m/sec}$
v	= 55 %
max.	= $97 \cdot 10^{-10} \text{ m/sec}$
min.	= $1 \cdot 10^{-10} \text{ m/sec}$

Wasserdichter herkömmlicher Beton hat Durchlässigkeitskoeffizienten in der Größenordnung von $50 \times 10^{-10} \text{ m/sec}$. Spritzbeton besonderer Zusammensetzung bringt es auf solche von weniger als $5 \times 10^{-10} \text{ m/sec}$. Wasserdicht ist weitgehend gleichbedeutend mit gasdicht. Seit die Karbonatisierung des Betons in aller Munde ist, haben wir uns selbstverständlich auch mit der CO_2 -Dichtigkeit des Spritzbetons befaßt. Bei Standardspritzbeton liegen die μ -Werte zwischen etwa 200 und 400. Spritzbeton besonderer Zusammensetzung erreicht einen μ -Wert von ungefähr 1.200. Das entspricht bei drei Zentimeter Stärke einem Diffusionswiderstand von 36 Metern. Gegenwärtig befassen wir uns mit einer Felduntersuchung über die Karbonatisierungsbeständigkeit von Spritzbeton. Dabei prüfen wir Spritzbetonbohrkerne, die aus landesweit verstreuten Bauwerken der letzten zwanzig Jahre stammen. Außer der Bestimmung der tatsächlichen Karbonatisierungstiefe laufen auch Laboruntersuchungen, um Rückschlüsse auf die praktischen Befunde zu ziehen.

Die Frostbeständigkeit von Spritzbeton beschäftigt uns seit vielen Jahren. Standardspritzbeton weist dank seiner besonderen Hohlraumstruktur eine gute Frostbeständigkeit auf. Das haben gefügemorphologische Untersuchungen ergeben, vor allem aber die noch aussagekräftigeren praktischen Versuche, etwa die Frostprüfung gemäß Richtlinie 5 der Schweizer SIA-Norm 162. Dabei unterwirft man die Proben 200 Frost-Tau-Zyklen. Ein Beton, dessen Elastizitätsmodul sich danach um weniger als 50 Prozent verringert hat, gilt als frostbeständig. Das trifft auf Standardspritzbeton fast ausnahmslos zu. Bei unseren Versuchen haben wir eine Trockengemischrezeptur gefunden, mit der man einen wesentlich frostbeständigeren Spritzbeton herstellen kann. Seine E-Modul-Verringerung

beträgt nach 200 Frostwechseln weniger als zwanzig Prozent.

Mehr Mühe bereitet uns die mangelnde Widerstandskraft gegen Frosttausalz. Wir haben noch kein Rezept entdeckt, um einen garantiert frosttausalzbeständigen Spritzbeton herzustellen. Gleich wie herkömmlicher Beton müssen auch Spritzbetonoberflächen noch immer mit Schutzanstrich versehen werden, damit sie das Tausalz vertragen.

Standardspritzbeton enthält mehr Zement als herkömmlicher Beton. Sofern die nötige Feuchtigkeit nicht fehlt, hydratisiert dieser Zement im Laufe der Zeit. Diese sogenannte Nachhydratation dauert viele Jahre, selbstverständlich mit abnehmender Tendenz. Unter normalen Umständen erhöht sich die 28-Tage-Druckfestigkeit bis zum 90. Tag um wenigstens 20 Prozent, und bis zu einem Jahr nimmt sie etwa um die Hälfte zu. (Es ist daher nicht weiter tragisch, wenn Spritzbeton nach 28 Tagen eine bestimmte Festigkeit geringfügig verfehlt. Wenn man ihn ausreichend feucht hält, holt er sie unter normalen Voraussetzungen rasch nach. Was zählt, ist in den meisten Fällen schließlich die Endfestigkeit, und nicht der eigentlich belanglose Wert nach 28 Tagen).

Die Nachhydratation verbessert nicht nur die Druckfestigkeit, sondern auch andere Eigenschaften des Spritzbetons, zum Beispiel seine Dichtigkeit. Die Zementsteinkristalle wachsen ja in die Hohlräume hinein, vor allem in die Kapillarporen. Dadurch verringert sich deren Querschnitt, zum Teil wird er allmählich sogar ganz verschlossen. Es liegt auf der Hand, daß der Durchlässigkeitskoeffizient mit der Zeit abnimmt: 214 Proben im Alter von fünf bis 60 Tagen weisen eine Kapillarporosität von 17.3 Volumenprozent auf; bei 45 Proben, die zwischen 61 Tagen und 4 Jahre alt waren, betrug die Kapillarporosität durchschnittlich nur 15.1 Prozent, also gut zwölf Prozent weniger.

Besonders stark nimmt im Laufe der Zeit die Haftfestigkeit zwischen Spritzbeton und Beton zu. Warum sie unter gleichen Bedingungen viel stärker wächst als die Druckfestigkeit, können wir uns noch nicht eindeutig erklären.

Der Haftung zwischen Spritzbeton und Beton widmen wir übrigens seit langem besondere Aufmerksamkeit, weil es auch in der Schweiz zusehends mehr Betonbauten zu sanieren gibt. Bei der Bestimmung der Haftfestigkeit bean-

sprechen wir die Bohrkern auf axialen Zug, wobei beidseitig kardanisch gelagerte Zugstangen wirken, so daß keine Biegemomente auftreten können.

Es ist zu bedenken, daß man bei diesem Versuch sozusagen ein "System" prüft, das sich aus der Zugfestigkeit des Betons, aus derjenigen des Spritzbetons und aus der Haftung zwischen Spritzbeton und Beton zusammensetzt. Das Versagen einer dieser drei Kräfte bedeutet, daß die beiden anderen größer sind. Manchmal erfaßt die Spritzbetonhälfte des geprüften Bohrkernes mehr als nur eine Spritzbetonschicht, so daß als viertes Glied der Kette auch noch die Haftung zwischen den Spritzbetonschichten hinzukommt (die meistens von der Haftung zwischen Beton und Spritzbeton abweicht).

Die Zahlen der folgenden Tabelle betreffen die Festigkeit des Systems:

Haftzugfestigkeit des "Systems" Spritzbeton - Altbeton				
		Alter des Spritzbetons		
		28 Tage	32 ... 171 Tage	1 ... 1.5 Jahre
n	=	218	116	50
\bar{x}	= N/mm ²	2.27	2.20	4.43
s	= N/mm ²	0.72	1.04	1.06
v	= %	31.7	47.3	23.9
max.	= N/mm ²	4.16	4.61	6.21
min.	= N/mm ²	0.60	0.55	1.30

Unsere Untersuchungen waren nicht allein auf die Materialeigenschaften des Spritzbetons gerichtet; wir haben uns auch mit zahlreichen anderen Problemen befaßt, auf die hier aus Zeitmangel nicht näher eingegangen werden kann. So konnten wir schon 1976 nachweisen, daß sauberes Rückprallgut ohne Nachteile wiederverwendet werden kann und daß man die Liegezeit des Trockengemisches nicht ungestraft überdehnen darf. Beide Erkenntnisse sind durch die Arbeiten von Prof. Fechtigs Institut an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich vollauf bestätigt worden.

Im Jahre 1979 haben wir mit vergleichenden Versuchen gezeigt, daß es unmöglich ist, vorspringende Felsspitzen mit wenigstens zwei Dritteln der durchschnittlichen Spritzbetonstärke zu überdecken, wie das die Schweizer SIA-Norm 198, die sogenannte Untertagebau-Norm, verlangt.

Am Ende fast aller unserer Arbeiten waren naturgemäß die neu aufgeworfenen Fragen zahlreicher als die beantworteten. Zusammen mit den Problemen, welche uns die tägliche Beschäftigung mit Spritzbeton stellt, werden sie dafür sorgen, daß uns auch in den kommenden Jahren die Freude am Forschen nicht vergeht.