

Injektionsverfahren als Baumethode (Erfahrungen mit Zement- und Kolloidzement- Injektionen)

Autor(en): **Maag, E. / Brun, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **71 (1953)**

Heft 37

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-60618>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Injektionsverfahren als Baumethode (Erfahrungen mit Zement- und Kolloidzement-Injektionen)

Von Stadtgenieur E. MAAG, Luzern und Ing. A. BRUN, Luzern

DK 624.138.24

1. Allgemeines

Der Ingenieur wird oft vor die Aufgabe gestellt, gewisse technische Eigenschaften von Bauwerken oder Bauwerkgliedern zu verbessern, so zum Beispiel die Tragfähigkeit von Fundationen, porösem Mauerwerk usw. zu erhöhen — ein Problem, das bei den auf allen Gebieten zunehmenden Belastungen alltäglich ist — oder die Widerstandsfähigkeit gegen äussere Einwirkungen zu vergrössern (Frost, Regen, Rauch, Chemikalien); oder die Dichtheit von Staumauern, Dämmen usw. wieder herzustellen, oder schliesslich die dynamischen Eigenschaften zu verändern (Fundamentalschwingungen). Neben den bekannten Baumethoden wie Unterfangen, Verkleiden, Isolieren usw. werden in letzter Zeit für derartige Aufgaben in vermehrter Masse die Verfahren der Injektion beigezogen. Man hat diese Verfahren bisher als Notlösungen gewertet, in erster Linie wohl deshalb, weil das Gelingen solcher Arbeiten in hohem Masse vom handwerklichen Können der hiezu beauftragten Spezialisten abhängig ist. Nachdem aber auch auf anderen Gebieten der Technik dem Faktor «Mensch» wieder vermehrtes Vertrauen zugebilligt wird¹⁾, dürften solche Argumente weniger ins Gewicht fallen, dies um so mehr, als sich zeigen lässt, dass mit dem Verfahren der Injektionen Lösungen ermöglicht werden, die mit anderen Methoden nur mit wesentlich grösserem Aufwand zu erreichen sind.

Zu diesen Aufgaben gesellen sich eine Anzahl arteigener Probleme, die nur durch Injizieren gelöst werden können: Herstellung der Dichtungsschleier bei Talsperren, Hinterpressen gepanzelter und nicht gepanzelter Druckstollen und Druckschächte, und anderes mehr. Schliesslich sei noch auf die Verwendung der in Rede stehenden Verfahren zur Hebung von Bauwerken hingewiesen, wo mit Erfolg nicht nur Platten von Betonstrassen, sondern auch ganze Baukörper gehoben wurden.

2. Anwendungsgebiete

Die Beurteilung des Einsatzes der Injektionsmethoden setzt die Kenntnis der technischen Eigenarten der verschiedenen Verfahren und ihrer Verwendung voraus. Die vorliegende Arbeit möchte deshalb die Grenzen der Anwendbarkeit generell beschreiben und alsdann Erfahrungen mit einem neuen Verfahren, einer Weiterentwicklung der Zementinjektionen, bekanntgeben.

Jede Injektion beruht auf einer Durchtränkung des zu behandelnden Materials; sie setzt deshalb von diesem eine gewisse Porosität voraus. Um die Hohlräume mit dem Injektionsgut ausfüllen zu können, müssen die einzelnen Poren nicht nur eine bestimmte Grösse aufweisen, sondern auch miteinander derart verbunden sein, daß ein Durchströmen der Injektionsflüssigkeit möglich ist. Physikalisch gesehen handelt es sich beim Injizieren somit um einen Strömungsvorgang in einem aus der Aneinanderreihung der Poren gebildeten System von

Kapillarröhren. Der Ueberdruck, der benötigt wird, um den Fluss des Injektionsgutes in Gang zu halten, muss den Reibungsverlust an den «Rohrwandungen» überwinden. Bei dieser laminaren Strömung ist die Fliessgeschwindigkeit direkt proportional dem Druckgefälle (Gesetz von Darcy), wobei jener Proportionalitätsfaktor die Materialkonstante darstellt, die den Strömungsvorgang und damit die Injektion quantitativ beschreibt, also die Durchlässigkeit des Materials bezeichnet. Diese in der Erdbaumechanik bekannte Durchlässigkeitsziffer k ist die für die Beurteilung der Injizierbarkeit massgebende Kennzahl. Ihr Bereich ist ausserordentlich gross, ist doch ein Kiessand eine Million mal durchlässiger als Lehm.

Es sei hier auf einen weitverbreiteten Irrtum hingewiesen: die Porosität — das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen — ist kein Mass für die Beurteilung der Injizierbarkeit. Hochporöse Stoffe, wie Lehm, Ton usw., sind praktisch undurchlässig und somit nicht injizierbar. Dieser scheinbare Widerspruch erklärt sich aus der Struktur des Korngerüstes, da die äusserst feinen Kornelemente eine sehr grosse Zahl mikroskopisch kleiner Hohlräume umschliessen.

In einer früheren Arbeit [1] haben wir die mathematischen Zusammenhänge beim Injektionsvorgang untersucht und dabei gefunden, dass der erfasste Raum um so grösser ist, je höher die Durchlässigkeitsziffer, je grösser der angewandte Druck, je dünnflüssiger das Injektionsgut und je länger die Einpresszeit sind. Man erkennt, dass bereits im Idealfall, wo das Injektionsgut als vollkommene Flüssigkeit vorausgesetzt war, die mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erzielbaren Aktionsradien stark beschränkt sind [2] *).

In Bild 1 sind die Anwendungsgebiete der verschiedenen Verfahren graphisch dargestellt. Es fällt sofort auf, dass alle stark undurchlässigen Materialien, wie Ton, Seekreide, Schluff, nicht injiziert werden können. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass definitionsgemäss der Durchlässigkeitskoeffizient unter Voraussetzung eines hydraulischen Gradienten «gleich 1» direkt die Filtergeschwindigkeit darstellt; daraus entnimmt man, dass zum Beispiel in einem Lehm das Fortschreiten der Injektionsströmung 10^{-6} cm/s, das heisst nur rund 1 mm pro Tag, beträgt. Wenn auch solchen Dimensionsbetrachtungen nur informatorische Bedeutung zukommt, so gestatten sie doch einen Einblick in die Mechanik des Strömungsvorganges.

Bild 2 soll eine Uebersicht geben über die mit den verschiedenen Verfahren der Injektion erreichbaren Resultate, und zwar getrennt nach der Dichtungswirkung einerseits und der Verfestigung andererseits. Die angegebenen Resultate sind Extremalwerte, die nur im Idealfalle homogenen Materials und homogener Durchströmung erreicht werden können²⁾.

*) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das am Schluss zusammengestellte Literaturverzeichnis.

2) Die Verfasser sind sich der Problematik dieser Zahlenangaben bewusst, sind aber der Auffassung, mit der Angabe der Grössenordnungen der Praxis einen Dienst zu erweisen.

1) Wir weisen hin auf das Schweissen, das sich trotz dem grossen persönlichen Anteil des Schweissers an der Sicherheit des Bauwerkes gegen die narrensichere Nietung durchsetzte.

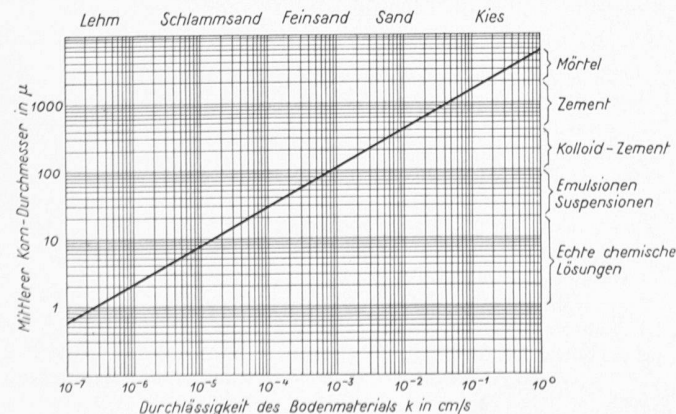


Bild 1. Anwendungsbereich der verschiedenen Methoden zur Verfestigung und Dichtung des Baugrundes

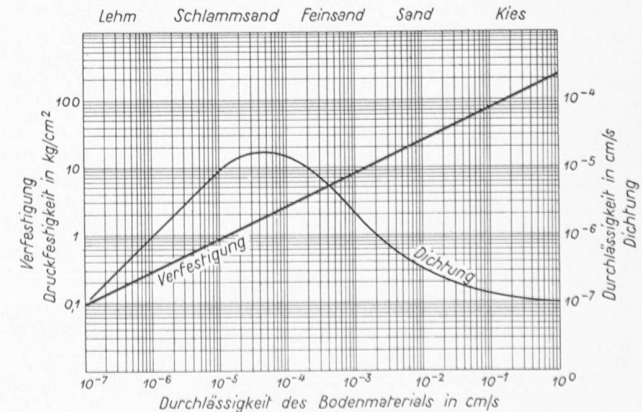


Bild 2. Grenzwerte der erreichbaren Verfestigung und Dichtung

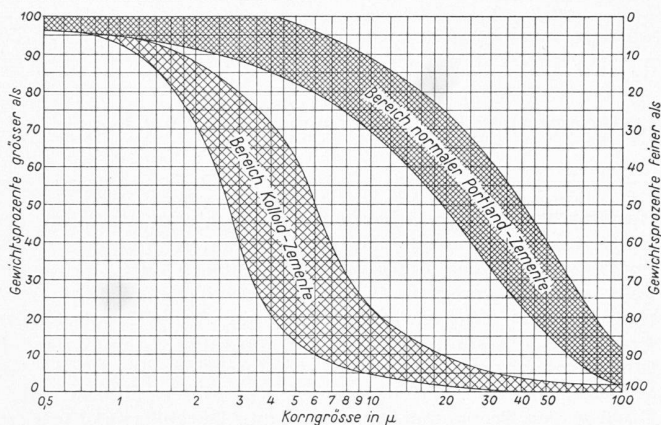


Bild 3. Konverteilungskurven von Zementen

Unter den heute bekannten Methoden haben sich die Zementinjektionen von jeher einer besonderen Beliebtheit erfreut, weil einerseits das Injektionsgut zu wirtschaftlich günstigen Bedingungen erhältlich ist und andererseits die damit erzielbaren Verfestigungseigenschaften von anderen Verfahren nicht erreicht werden. Hiezu mag ferner die genaue Kenntnis des Grundstoffes «Zement» beigetragen haben, dessen Verhalten zum injizierten Baustoff, wie auch seine Veränderungen im Laufe der Jahre weitgehend abgeklärt sind; es wird ein dem Beton verwandter Stoff verwendet.

Leider ist ihr Anwendungsgebiet beschränkt, da die verhältnismässig grossen Zementkörner (mittlerer Korndurchmesser $\sim 25 \mu$) in den feinen Poren ausfiltriert werden. So war es bis anhin nur möglich, Kiese, grobporigen Beton usw. zu behandeln, während weniger durchlässige Materialien, wie Sand usw., die Aufnahme von Zementmilch verweigerten. Es lag daher nahe, die Möglichkeiten einer Ausweitung des Anwendungsgebietes zu suchen. Grundsätzlich sind hierzu folgende zwei Wege gangbar: Entweder verfeinert man das Injektionsgut, oder man weitet die Poren aus. Die Verwirklichung der einen oder anderen Forderung ist von besonderem Interesse, weil dadurch nicht nur die strömungstechnischen Eigenschaften verbessert werden, sondern auch der Filtereffekt kleiner ausfällt.

Durch Weiterverarbeiten von handelsüblichem Portlandzement ist es gelungen, einen Zement herzustellen, dessen mittlerer Korndurchmesser kleiner als 10μ ist, also kolloidale Abmessungen aufweist. Die chemische Zusammensetzung dieses Kolloidzementes, wie auch seine technischen Eigenschaften, unterscheiden sich kaum von denjenigen eines Normalzementes. Die Mahlfeinheit ist so gross, dass auf dem Zehntausendmaschensieb nur Spuren zurückbleiben, während der Portlandzement schon auf dem Viertausendneuhundertmaschensieb 2 bis 10% Rückstand ergibt, Bild 3. Neben der Verbesserung des Filtereffektes bringt die Verkleinerung des Korndurchmessers einen wesentlich günstigeren Sedimentationsgrad; er ist nach einer Stunde angenähert gleich gross wie beim Normalzement nach 5 Minuten [4]. Diese Eigenschaft, die durch Zugabe von Dispergierungsmitteln noch gesteigert werden kann, ist für die praktische Durchführung von Injektionsarbeiten von besonderer Wichtigkeit, da sie ein Dekantieren des Injektionsgutes in Pumpen- und Rohrleitungen weitgehend verhindert und damit die Injektion von wenig aufnahmefähigen Injektionszonen überhaupt erst möglich macht.

Im weitem ist bekannt, dass nicht der gesamte Porenquerschnitt am Strömungsvorgang beteiligt ist, weil an den Wänden Kapillarfille haften [5]. Durch Zusatz von Chemikalien gelingt es, die Eigenschaften der Kapillarfille derart zu beeinflussen, dass das Eindringungsvermögen erhöht wird. Die Kombination der beiden Möglichkeiten — Kolloidzement und chemische Zusatzmittel — erlaubt es, das Anwendungsgebiet von Zementinjektionen auf zehnt- bis hundertmal weniger durchlässige Materialien zu erweitern, das heisst, in das Gebiet der Sande und Feinsande vorzudringen. Das Verfahren hat sich in den letzten fünf Jahren bewährt. Wir halten es demzufolge für angebracht, der Praxis einige Erfahrungen mitzuteilen.

3. Ausführungsbeispiele

a) Seebrücke Luzern

Die im Jahre 1870 erstellte alte Seebrücke ruhte auf sechs Betonpfeilern, von denen die Hälfte in offener Baugrube über

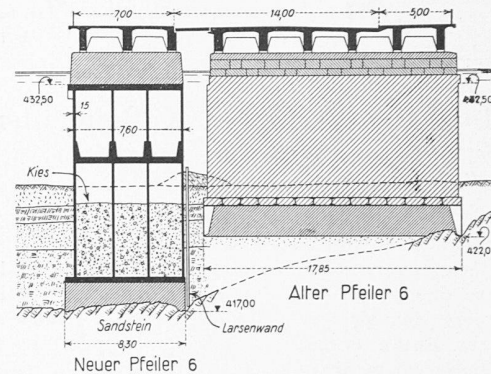


Bild 4. Seebrücke Luzern, Querschnitt 1:500

hölzernen Pfählen aufgebaut wurde, während die andere Hälfte auf abgesenkten eisernen Caissons aufsteht (Bild 4 u. 5). Als im Jahre 1933 die alten Gitterträger durch eine neue Eisenbetonkonstruktion³⁾ ersetzt wurden, sind die genannten Pfeiler nach durchgeführten Probelastungen wieder verwendet worden. Weder die Beobachtung über ein halbes Jahrhundert, noch die Belastungsversuche liessen das geringste Anzeichen erkennen, das auf aussergewöhnliches Verhalten der Pfeiler hätte schliessen lassen. Erst die in den Kriegsjahren durchgeführten militärischen Umbauten ergaben eine aussergewöhnliche Porosität der Pfeilerschäfte; stellenweise fehlte das Bindemittel nahezu vollständig. Anhand der Akten aus der Bauzeit ergab sich, dass seinerzeit die Pfeilerschäfte innerhalb einer Holzschalung «unter Wasser» betoniert worden sind. Ob bei diesem an sich delikaten Arbeitsvorgang Kunstfehler unterlaufen sind, oder aber der weniger hoch gebrannte Zement jener Zeit im Laufe der Jahrzehnte durch das Flusswasser ausgelaugt wurde, konnte nicht mit Sicherheit abgeklärt werden. Es galt nun, die Pfeiler zu konsolidieren [7]. Dabei zeigte es sich, dass die Porosität des Mauerwerkes ganz unterschiedlich war. Es wechselten Stellen grosser Aufnahmefähigkeit mit solchen, die jegliches Injizieren refüsierten. Wenn auch mit einer solchen Heterogenität gerechnet werden musste, war dieser Umstand unbefriedigend und gab Veranlassung, das skizzierte Kolloidzementverfahren (gesetzl. geschützt) zu entwickeln, das eine befriedigende Verfestigung selbst sandiger Partien erlaubt. Um ein Durchbrechen des Injektionsgutes gegen die Aussenflächen und zugleich ein Absprengen der äusseren Mauerwerkschichten zu verhindern, wurden die zulässigen Injektionsdrücke auf maximal 4 atü beschränkt. Die dadurch bedingten kleineren Wirkungsradien und der damit verbundene Mehraufwand an Bohrleistung mussten in Hinblick auf die Sicherheit des Bauwerkes in Kauf genommen werden.

Im Verlaufe der Arbeiten wurde auch die Caissondecke durchbohrt und dort ein Hohlraum festgestellt, der von einer mangelhaften Ausmauerung der ehemaligen Arbeitskammer herrührte. Dieser Hohlraum wurde mit einer Injektionsmasse pastenähnlicher Konsistenz, bestehend aus Zement, Bentonit, Steinmehl und Wasserglas, aufgefüllt. Die Tabelle gibt einen Überblick über den Umfang der Arbeiten. Die injizierten Mengen von 333,4 t Injektionsgut, wie auch die spezifischen Injektionsmengen von 104 kg/m³ Mauerwerk, oder 160 kg pro Meter Bohrloch, lassen die Notwendigkeit der Konsolidation und deren Erfolg klar erkennen⁴⁾.

b) Obere Aarebrücke der BLS in Interlaken

Dieses Beispiel behandelt ein klassisches Arbeitsgebiet der Injektion. Die Brückenpfeiler und Widerlager waren den immer grösser werdenden Verkehrslasten, Fahrgeschwindigkeiten und Verkehrsintensitäten nicht mehr gewachsen. Die beobachteten, zum Teil ungleichmässigen Setzungen zeigten in den letzten Jahren eine zunehmende Tendenz. Pfeiler und Widerlager ruhten auf etwa 8 bis 10 m langen Holzpfählen. Der Baugrund besteht aus einer kiesig-sandigen Deltaablagerung verschiedener Durchlässigkeit und Lagerungsdichte.

Es handelte sich somit darum, die Tragfähigkeit der vorhandenen Pfähle durch Verbesserung der Bodeneigenschaften zu erhöhen. Da die Tragfähigkeit der Pfähle zum grossen Teil auf ihrem Spitzenwiderstand beruht, wäre eine Verfestigung

³⁾ Beschrieben in SBZ, Bd. 110, S. 112* (4. Sept. 1937).

⁴⁾ Arbeitsausführung durch Arbeitsgemeinschaft Swissboring Zürich-Gebr. Brun, Luzern.

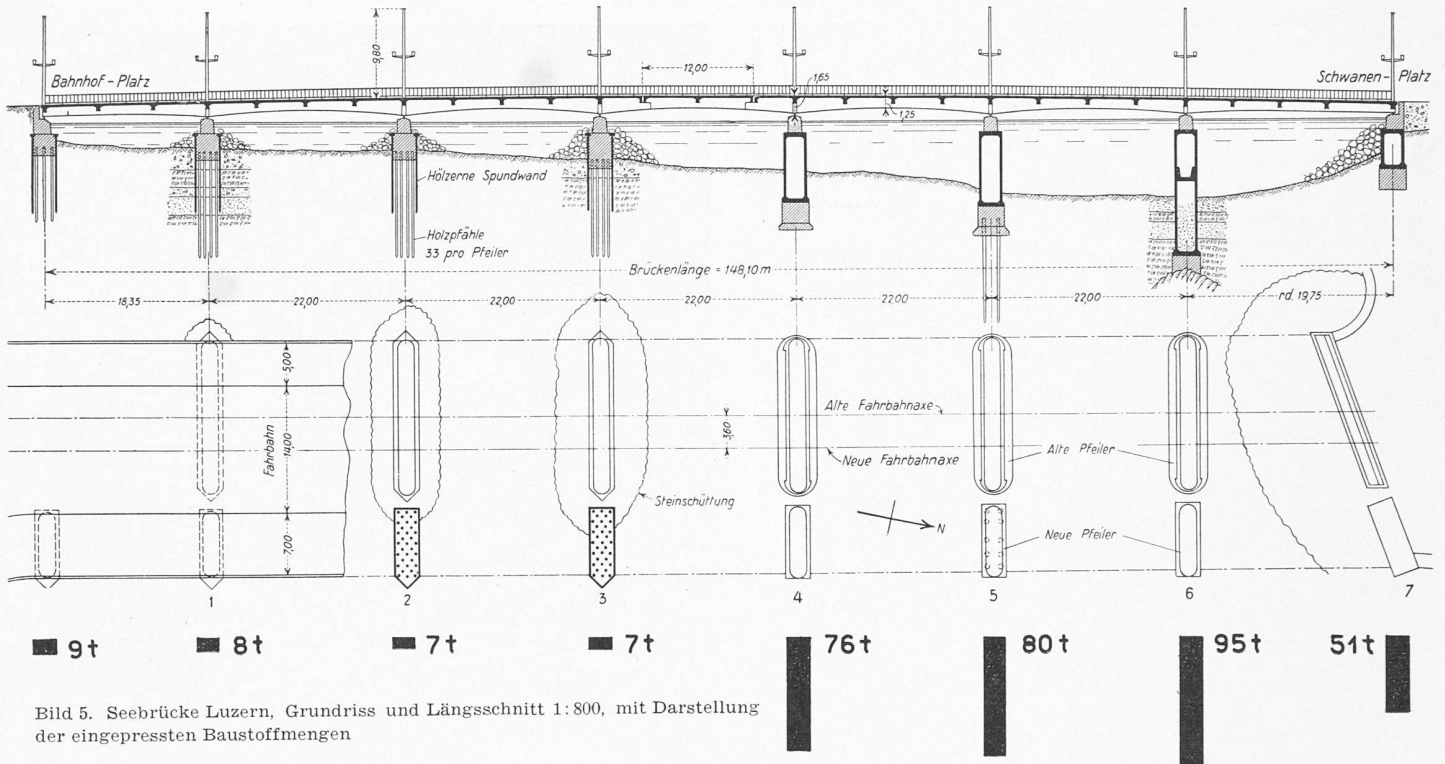


Bild 5. Seebrücke Luzern, Grundriss und Längsschnitt 1:800, mit Darstellung der eingepressten Baustoffmengen

dieser Zone am wirtschaftlichsten gewesen. Die Sondierbohrungen ergaben aber, dass gerade jene Tiefenstufe Durchlässigkeitswerte von der Grössenordnung von 10^{-4} cm/s aufwiesen und somit ihre Verfestigung nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden konnte. Es verblieb die Möglichkeit der Verfestigung des die Pfahlschäfte umgebenden Materials (Durchlässigkeit 10^{-2} bis 10^{-3} cm/s), um damit einerseits die Seitenreibung der Pfähle zu verbessern und andererseits die Tragfähigkeit des unter den Fundamenten liegenden Raumes zu vergrössern und auf diese Weise eine Ueberleitung der Spannungen auf die tieferliegenden Schichten zu gewährleisten.

Die Injektion der vorbeschriebenen Zonen erfolgte aus Gasrohren, die mit verloraener Spitze gerammt und im Verlaufe der Einpressung sukzessive zurückgezogen wurden. Für die an-

gewandten Drücke wurde die Regel aufgestellt, dass der grösste Einpressdruck in atü nicht grösser sein dürfe als die Anzahl Meter der Injektionsstelle unter Terrain; zudem waren sie proportional der eingepressten Zementmenge herabzusetzen.

Zur Kontrolle des Arbeitsfortschrittes wurden die erzielten Wirkungsradien für die jeweiligen Tiefenstufen laufend aufgezeichnet. So ergab sich die Möglichkeit, die erreichten Resultate zu überblicken, das heisst in Zonen schwacher Zementaufnahme Ergänzungsinjektionen mit Kolloidzement anzusetzen und umgekehrt übermässige Einpressungen zu vermeiden. Bild 6 zeigt eine schematische Aufzeichnung der Ergebnisse⁵⁾.

⁵⁾ Arbeitsausführung AG. für Grundwasserbauten, Bern. Kolloidzement durch Gebrüder Brun AG., Luzern.

Seebrücke Luzern, Konsolidierung der Pfeiler, Zusammenstellung

Pfeiler	Widerlager Bahnhof	1	2	3	4	5	6	Widerlager Schwanen	Total
Anzahl Bohrlöcher	11	22	22	21	47	40	45	19	227
Anzahl m Bohrlänge	32,00	66,00	83,59	80,50	288,70	266,21	300,35	88,50	1205,85
Kubatur des Pfeilerschaftes (m ³)	94,00	135,40	169,26	174,90	342,03	367,38	359,77	213,60	1856,34
<i>Eingepresste Mengen in t:</i>									
Portland- bzw. Kolloidzement	5,80	7,60	5,80	6,45	37,30	43,30	47,25	10,85	164,35
Schaft	—	—	—	—	14,20	16,90	16,95	18,55	66,60
Caisson	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	5,80	7,60	5,80	6,45	51,50	60,20	64,20	29,40	230,95
Steinmehl: Schaft	2,97	0,67	0,97	0,97	5,26	0,01	12,50	3,13	26,48
Caisson	—	—	—	—	16,90	16,90	16,95	17,05	67,80
Total	2,97	0,67	0,97	0,97	22,16	16,91	29,45	20,18	94,28
Bentonit: Schaft	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Caisson	—	—	—	—	1,02	0,94	1,16	1,31	4,43
Total	—	—	—	—	1,02	0,94	1,16	1,31	4,43
Sand: Schaft	—	—	—	—	0,06	1,90	—	—	1,96
Caisson	—	—	—	—	—	—	—	0,36	0,36
Total	—	—	—	—	0,06	1,90	—	0,36	2,32
Chemikalien im Schaft: Chemikal I	—	—	—	—	0,81	—	0,08	—	0,89
Chemikal II	—	—	—	—	0,35	—	0,12	—	0,47
Total	—	—	—	—	1,16	—	0,20	—	1,36
Total: Schaft	8,77	8,27	6,77	7,42	43,43	45,21	59,96	13,98	193,85
Caisson	—	—	—	—	32,47	34,74	35,06	37,27	139,55
Total Schaft und Caisson	8,77	8,27	6,77	7,42	75,90	79,95	95,01	51,25	333,41
<i>Spezifische Injektionsmengen:</i>									
kg pro m ³	93,35	61,11	40,02	42,45	126,99	123,07	166,66	65,48	104,42
kg pro m Bohrloch	274,21	125,37	81,05	92,23	150,45	169,84	199,63	158,05	160,75

Die im Laufe der letzten Jahre durchgeführten Kontrollnivelements haben keinerlei Bewegung gezeigt.

4. Schlussfolgerungen

Die geschilderten beiden Beispiele erlauben die Aufstellung einiger Grundsätze zur Beurteilung der Wirksamkeit von Injektionen. Die Diskussion der Resultate wird immer auf spekulativen Schlüssen aufgebaut werden müssen, da eine direkte Kontrolle mit den in der Bautechnik üblichen Verfahren selten möglich ist. Zur Beurteilung stehen unter anderem zur Verfügung:

a) *Die eingepressten Mengen:* Die Verteilung des Injektionsgutes im Raume ergibt ein Bild über die Homogenität der erreichten Verfestigung. Es ist zu bedenken, dass bei dem Nebeneinander von durchlässigen und weniger durchlässigen Materialien nur eine korallenartige Struktur der Verfestigung erreicht werden kann. Dies ist aber in den meisten Fällen durchaus hinreichend.

b) *Die Beobachtungen beim Injektionsvorgang:* Grösse und Variation des Einpressdruckes lassen wichtige Schlüsse auf die Art der Ausbreitung des Injektionsgutes zu. Langsame und stetige Druckzunahme deutet auf eine gleichmässige Durchdringung der behandelten Zone, sprungweise Aenderungen weisen auf Ausbrüche, Strukturstörungen usw. hin.

c) *Kontrollbohrungen:* Rotationsbohrungen mit Kernentnahme geben einen direkten Einblick in den behandelten Raum (Bild 7), wie das aus den Photographien der Anschliffe der Kernproben deutlich ersichtlich ist. Die Ausbeute an gut verfestigten Bohrkernen ist notwendigerweise wegen der Inhomogenität des Materials beschränkt. Zudem ist zu bedenken, dass der Abbinde- und Erhärtungsvorgang im kühlen Grundwasser ganz wesentlich längere Zeiträume erfordert.

Auch bohrtechnisch bietet die Kernentnahme Schwierigkeiten. Im grobkörnigen Material sind die Abmessungen der grössten Elemente von der Ordnung des Bohrlochdurchmessers. Werden diese vom rotierenden Bohrer erfasst, so wirken sie als Mahlsteine und zertrümmern bereits aufgefangene Kernstücke.

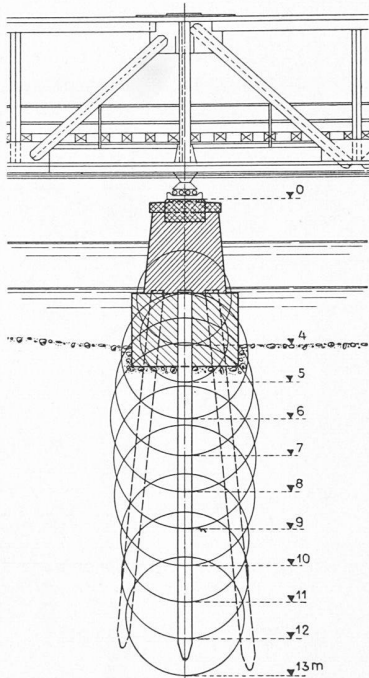


Bild 6. Mittelpfeiler Ostseite, theoretische Aktionsradien der Injektionen, 1:200

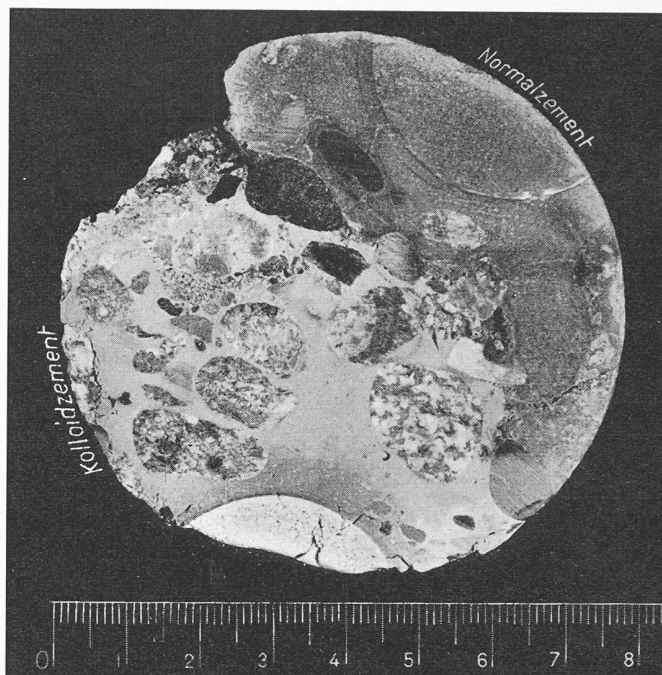


Bild 7. Anschliff eines Bohrkerns, natürliche Grösse
Obere Aarebrücke der BLS in Interlaken-Ost

Zusammenfassung

In vorstehender Arbeit werden die technischen Möglichkeiten der Injektionsverfahren skizziert, insbesondere deren Wirkung hinsichtlich Verfestigung und Dichtung untersucht. Im weiteren werden die Möglichkeiten zur Vergrösserung ihrer Aktionsradien besprochen und dann ein Verfahren angegeben, welches das Anwendungsgebiet der Zementinjektionen bedeutend vergrössert. Anhand von zwei konkreten Ausführungsbeispielen wird gezeigt, dass damit Lösungen möglich werden, die auf andere Weise nicht oder nur mit wesentlich grösserem Aufwand erreicht werden können.

Literaturverzeichnis:

- [1] Maag E.: Verfestigung und Dichtung des Baugrundes. «Hoch- und Tiefbau» 1938.
- [2] Kollbrunner C. F., Ing. Dr., Blatter Ch.: Bericht Nr. 4 der Privatgesellschaft für Bodenforschung und Erdbaumechanik, Zürich 1941, Verlag Leemann.
- [3] Kollbrunner C. F., Ing. Dr.: Fundation und Konsolidation, Band II, Zürich 1947, Schweizer Druck- und Verlagshaus.
- [4] Esemwein Dr. P.: Sedimentationsanalysen, persönliche Angaben an die Verfasser.
- [5] Haefeli R. Prof. Dr.: Drei Lockergesteine und ihre techn. Probleme. SBZ Bd. 112, S. 133* (10. Sept. 1938).
- [6] A. von Moos und F. de Quervain: Technische Gesteinskunde, Verlag Birkhäuser, Basel.
- [7] M. Ros, Dr. h. c.: Gutachten über die Konsolidierungsarbeiten Seebrücke Luzern.

DK 625.712.35:628.8 (43)

Schluss von Seite 526

Lüftungsentwurf für den Wagenburgtunnel in Stuttgart

Von Dr.-Ing. H. H. KRESS, Verein Beratender Ingenieure (VBI), Stuttgart

3. Kritische Ueberlegungen zur Frage direkter Absaugung im unteren Teil des Verkehrsraumes

Die Stuttgarter Analysen der Dieselauspuffgase widerlegen in Verbindung mit amerikanischen Analysen der Benzinauspuffgase, wonach in beiden Fällen rund 82 Vol. % sofort nach oben entweichen, die von anderer Seite [14] propagierte und zunächst auch in Stuttgart bauseits hartnäckig verfochtene Meinung, die zweckmässigste Lüftungsart sei direkte Absaugung im unteren Teil des Verkehrsraums. Es ist einleuchtend, dass bei diesen Verhältnissen die Absaugung oben weniger Kraftaufwand erfordert als die Absaugung unten. Für den Wagenburgtunnel wurde überprüft, ob direkte Absaugung unten eine nennenswerte Senkung des Frischluftbedarfs bewirken kann. 18 Vol. % der Abgase bleiben als Schwergase im unteren Teil des Verkehrsraums. Verschiedene Höhenlagen der Auspuffrohre von LKW, KOM und Traktoren lassen die Auspuffgase verschieden hoch ausströmen. Für die Theorie direkter Absaugung von unten werden folgende Argumente vorgebracht [14]: Die Luftströmung um den fahrenden

Wagen reisst je nach Bauart und Wagengrösse längs des Fahrzeugs ab und bildet hinter ihm Wirbel. Heisse, leichte und mittelschwere Gase strömen aufwärts in eine zwischen den Wirbeln hinter dem Wagen vorhandene Unterdruckzone, wo sie von der an der hinteren Wagenwand abwärts strömenden Luft gestaut, in ihrer Aufwärtsbewegung gehemmt und auf die Temperatur der Tunnelluft abgekühlt werden. Leichte und dichte Rauchgase sondern sich dabei ab und strömen allmählich hoch. Wenn man oberhalb besagter Unterdruckzone in verschiedener Höhenlage absauge, könne man die schweren, über der Fahrbahn liegenden Abgase durch Saugschlitze in Höhe der Auspuffrohre unmittelbar absaugen, während aufsteigende Abgase wegen des Unterdrucks von höher liegenden Saugschlitzen her zwangsläufig zu diesen fliessen und durch sie abziehen würden. Damit würden sichtverschlechternde dichte Abgase ohne vorherige Verdünnung mit Frischluft grösstenteils verschwinden. Wenn man ausserdem von oben Frischluft eindrücke, also von oben nach unten querbelüfte, würde die von oben nach unten strömende Frischluft