

Niedrigdruck-Fundamentbett-Unterwasserinjektion unter einem Bauwerk

Zusammenfassung

Über die Erfahrungen mit einer großflächigen Niedrigdruck-Unterwasserinjektion unter einem Bauwerk wird berichtet. Die Problematik bestand darin, ein unter Auftrieb befindliches Bauwerk während eines Bauzustandes mit relativ geringem effektiven Gewicht mit Mörtel zu unterpressen. Während der Herstellung des Fundamentbettes durfte das Bauwerk nicht durch die Stempelwirkung des Kuchens hochgedrückt werden. Zudem wurde eine möglichst vollflächige Verpressung verlangt. Neben der systematischen Ermittlung der Mörtelmischung und der Pumpaggregate wurden die Testuntersuchungen methodisch aufbereitet. Die Abhängigkeiten des effektiven Verpreßdrucks und des Abhebedrucks von der Kornform, dem spezifischen Mörtelgewicht und dem chemischen Zusatzmittel werden dargestellt und interpretiert.

Summary

Low pressure foundation bed underwater-injection. This report is dealing with the experience of low height large area occupying, low pressure underwater injection under a pump station. The encountered problematic was to find and select a grout mixture and application pumps which would effectively distribute the grout without causing uplift to the relative low effective weight structure. The testing of various types of grout and the influence of two principal pump types are presented. The influence of the effective injection and uplift pressure in the tributary grout cake does greatly depend on the aggregate surface form, the specific weight of various grout types and the admixtures.

1 Einleitung

In [1] wurde der Bau der Pumpstation beschrieben, und die Gründe für die Unterwasserbetinjektion wurden dargelegt. Dieser Bericht gibt die Ergebnisse der Vorbereitungstests und die Erfahrungen der Ausführungsoperation wieder.

Aufgrund des Bauablaufs und der hydrogeologischen Situation hatte die schwimmende Pumpstation nach dem Absetzen auf die vier Eckfundamente nur ein effektives Gewicht von ca. 1000 t. Da der Verpreßdruck durch die inneren und äußeren Reibungskräfte im Ausbreitkuchen mit dem Ausbreitradius nichtlinear ansteigt, entstehen proportional Drücke in allen drei Richtungen (Bild 1). Während des Ausbreitens des Mörtelkuchens entstehen so in der Kontaktfläche zwischen Injektionsgut und Bodenplatte Abhebedrücke (σ_n). Diese können ein „leichtes“ Bauwerk, besonders, wenn dieser Stempelfeffekt exzentrisch auftritt und ein Moment neben der Normalkraft entsteht, von den Fundamenten abheben. Dies würde zu irreversiblen Folgen hinsichtlich der Horizontalität und des nicht mehr satt ausgefüllten Spalts führen.

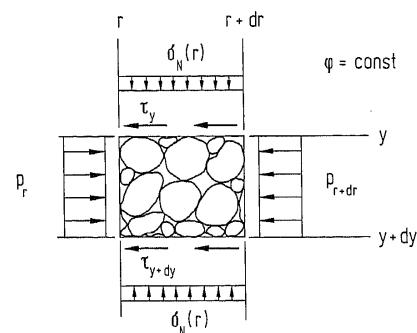
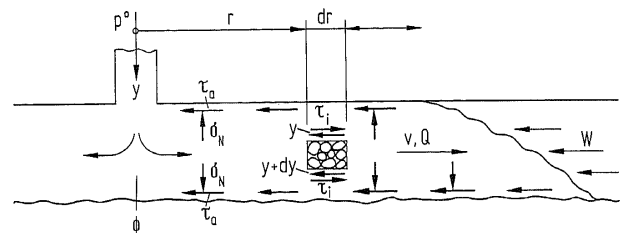
Aus diesen Gründen wurde eine Serie von Tests durchgeführt, um das optimale Mörtelverpreßgut zu bestimmen und die richtige Maschinenauswahl zu treffen, da meist nur Erfahrungen mit Hochdruckverpressungen [3] vorliegen.

2 Vorbereitungstests

2.1 Einführung

Das Testziel bestand darin, Mörtelmischungen und Injektionspumpen zu ermitteln, die mit geringem Differenzverpreßdruck (P_{eff}) ein effektiv großflächiges Injizieren ermöglichen, ohne das Bauwerk selbst anzuheben.

Die Tests wurden an einem Testmodell mit der Größe von 6,00 m × 6,00 m × 2,00 m, das aus zwei ineinandergestellten Betonkästen mit einer Wanddicke von ca. 25 cm bestand, durchgeführt. Auf die Bodenplatte des äußeren Kastens wurde Monokies 25–36 mm gefüllt, um das Fundamentbett der Pumpstation zu simulieren. Der innere Kasten wurde in den äußeren Kasten auf vier kleine 25 × 25 cm Fundamente gesetzt, die einen umlaufenden Schlitz von ca. 20 cm zwischen inneren und äußeren Kästen erzeugten. Dieser Hohlraum wurde nun mit Wasser gefüllt. Der Auftrieb des inneren Kastens wurde errechnet und Ausgleichsballast zugegeben. Aufgrund des vorgegebenen effektiven Gewichts konnte der Abhebedruck während des Injizierens aus dem Ausbreitradius bzw. der Fläche ermittelt werden (Bild 2). Es wurde solange mit einem vorgegebenen Druck injiziert, bis sich der Kasten aus den markierten Ecken abhob. Das Ab-

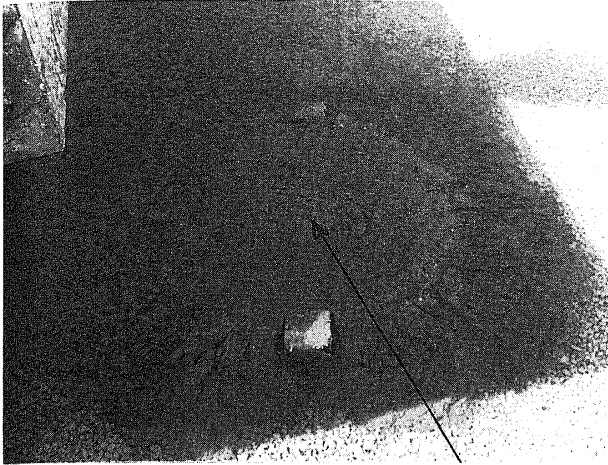


- p^0 Totaler Injektionsdruck an der Austrittsstelle
- p_r Totaler Injektionsdruck an der Ausbreitstelle r
- p_{eff}^0 Effektiver Ausbreitdruck an der Austrittsstelle
- $p_{eff}(r)$ Effektiver Druck an der Ausbreitstelle r
- w Äußerer Wasserdruck
- $p^0 = p_{eff}^0 + w; p_r = p_{eff}(r) + w$
- $\sigma_n(r)$ Abhebedruck
- τ_a Äußerere Oberflächenreibung
- τ_i Innere Schubspannung

Bild 1. Beziehungen zwischen den inneren Kräften im Verteilungskuchen

Fig. 1. Internal stress relations inside the tributary cake

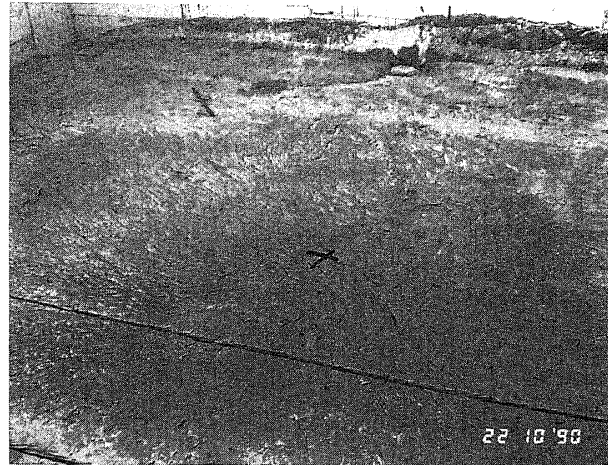
Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Design Manager Fru-Con Construction Corporation St. Louis (USA), Tochtergesellschaft der Bilfinger + Berger Bau AG Mannheim, Auslandsbereich Wiesbaden Postfach 15 09, 6200 Wiesbaden 1



Injektionskuchenausbreitung

Bild 2. Injektionstest: Verteilung des Mörtels im Spalt unter dem Testkasten nach dem Abheben des inneren Kastens

Fig. 2. Injection Test: Tributary grout area under the test box after removal



Fertige Injektion

heben wurde mittels Meßdosen ermittelt. Dann wurde der innere Kasten herausgehoben und der Ausbreitradius gemessen. Rechnerisch konnte dann durch das bekannte effektive Gewicht der mittlere Abhebedruck (σ_n), der sich im Mörtel durch innere Reibung gebildet hatte, präzisiert werden. Zudem wurde die Auswirkung des Pumpentyps auf den Abhebedruck untersucht. Dabei wurde der quasi kontinuierliche Mörtelfluß (Strömung) der großen Kolbenhübe von ca. 240 cm gegenüber dem Pulsieren des nicht kontinuierlichen Mörtelflusses einer Pumpe mit kleinen Kolbenhüben von ca. 24 cm verglichen.

Hierbei wurden die in Tabelle 1 angegebenen Mörtelmischungen untersucht und deren spezifisches Verhalten hinsichtlich der Fließfähigkeit analysiert. Die Parameter, die die Fließfähigkeit (Tabelle 1) bzw. die innere Reibung während der Ausbreitung beeinflusst haben, sind:

- Kornform,
- Dichtigkeit/Raumgewicht und
- (Schmierwirkung) Lubrikation.

Ferner wurde die Auswirkung der pulsierenden und quasi kontinuierlichen Wirkung der Pumpe auf den Verpreßdruck der Applikationsstelle hin durchsucht.

2.2 Interpretation der Ergebnisse

Folgende Beeinflussung geht von der gebrochenen und abgestuften Kornform bzw. vom glatten Monokorn aus: Mix 1 und 2 (siehe Tabelle 1):

- a) Die Fließfähigkeit am Ausbreittisch wird gering beeinflusst ($f(\gamma)$; Bild 3).
- b) Der Verpreßdruck an der Verpreßstelle wird allerdings durch das glatte Monokorn beinahe halbiert ($P_{eff}^0(\gamma)$; Bild 3).

Das Ausbreitmaß ohne inneren Druckaufbau hängt hauptsächlich vom Verhältnis Zementleim, Plastifizierer (Schmiermittel) und Raumgewicht ab. Dies ist im Mix 1 und 2 fast identisch. Der innere Druckaufbau in einem geschlossenen Spalt unter Ausbreitung des Mörtels in ausschließlich radialer Richtung wird während des Ausbreitens des Mörtels durch die Coulombsche Gleitreibung der translatorischen und rotatorischen Bewegung der Sandkörner während des Strömens [6] sowie durch die Kontaktreibung zwischen Grobkiesbett und Unterseite Bodenplatte (Bild 1) verursacht.

Die grobe gebrochene Körnung verkeilt und verklemmt sich ineinander und beansprucht für die Verteilung wesentlich größere Drücke. Das glatte Monokorn gleitet übereinander, der Leim aus Zement und Verflüssiger wirkt als Lubrikationsmittel.

Die Reduktion des Raumgewichts durch Luftporenbildner wird im Bild 3 deutlich durch den Vergleich von Mix 2 ohne Luftporenbildner mit Mix 3 mit Luftporenbildner. Sie hat folgenden Einfluß:

- a) Die Fließfähigkeit verdoppelt sich.
- b) Der Verpreßdruck reduziert sich fast um 4/5.

Die Gründe liegen in der um ca. 36% verringerten Sandmenge. Die Hohlräume werden durch Mikroluftbläschen gefüllt. Diese haben eine sehr günstige Wirkung auf die sich in Bewegung befindlichen Sandkörner. Die Mikroluftblasen trennen die Sandkörner und reduzieren somit die innere Reibung.

Tabelle 1. Injektionsmörtelmischungen und Eigenschaften

Table 1. Injection grout mixes and characteristics

Material	t/m ³	Mix 1 l/m ³	Mix 2 l/m ³	Mix 3 l/m ³	Mix 4 l/m ³
1 gebrochener, abgestufter Sand 0-3 mm	2,60	246	-	-	-
2 glatter Monosand 3 mm	2,55	-	246	157	-
3 Zement	3,20	242	242	236	365
4 Bentonite	2,65	47	47	47	47
5 Wasser	1,00	455	455	491	573
6 Verflüssiger und Verzögerer	1,20	10	10	9	15
7 Luftporenbildner	0,7 %	-	-	60	-
Eigenschaften					
1 Raumgewicht	t/m ³	2,01	1,99	1,79	1,88
2 Wassermischfaktor	-	0,59	0,59	0,65	0,49
3 Verzögerung d. Anstehens (Luft 23 °C)	h	11	11	12,5	12,00
4 Festigkeiten nach 3/7/28 Tagen	N/mm ²	17 18 18,5	13 19 19	8 9 13	20 21 21,5
5 Fließfähigkeit	cm/Schläge	23/25	29,5/25	25/10	23/10

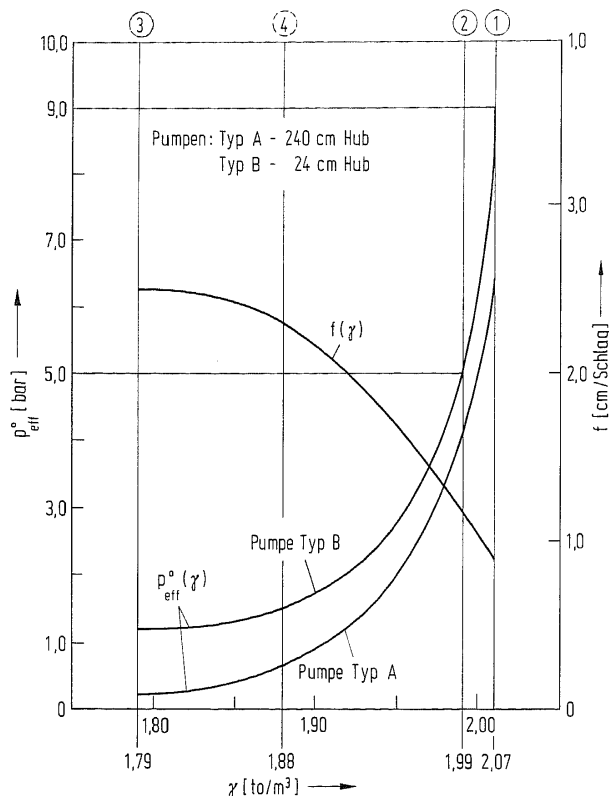


Bild 3. Fließfähigkeit und effektiver Applikationsdruck in Abhängigkeit vom Raumgewicht, Kornoberfläche und Pumpenhub

Fig. 3. Relation between the grout flowability, application pressure and the specific grout weight – aggregate surface form – pump stroke amplitude

Unabhängig von den inneren Kenngrößen beeinflusst das gleichmäßige bzw. das pulsierende Pumpen den Verpreßdruck. Das gleichmäßige Drücken durch sehr große Kolbenhübe ergab unter Verwendung des gleichen Materials wesentlich geringere Verpreßdrücke als das pulsierende Drücken durch kleine Kolbenhübe (Bild 3).

Die Begründung liegt darin, daß große Kolbenhübe einen gleichmäßigen Materialfluß erzeugen bei beinahe konstanter Geschwindigkeit, wohingegen kleine Kolbenhübe eine ungleichmäßig pulsierende Geschwindigkeit des Materialflusses erzeugen. Dieses Phänomen läßt sich wie folgt interpretieren:

- 1) Die Gleitreibung des Strömungswiderstandes ist in gewissen Bereichen abhängig von der Relativgeschwindigkeit besonders dann, wenn die Relativbewegung des Mediums durch die Stoßwirkung [5] zyklisch schwankt.
- 2) Der Strömungswiderstand verhält sich wie ein Bingham-Medium mit dilatanter Charakteristik.
- 3) Durch die Stoßwirkung und die damit zyklisch schwankende Geschwindigkeit sind zusätzlich Beschleunigungskräfte (Newton Gesetz) notwendig, die den Verpreßdruck in der Zuführungsleitung erhöhen.

Dadurch kommt es im Ausbreitungskuchen zu einem Anstieg des Druckes in allen Richtungen, auch in vertikaler Richtung unter der Bodenplatte. Zudem ist die Verpreßmenge (m³/h) bei kleinen Kolben wesentlich geringer. Die ermittelte Abhängigkeit des Abhebedrucks (σ_n) vom effektiven Verpreßdruck (P_{eff}^o) ist in Bild 4 dargestellt.

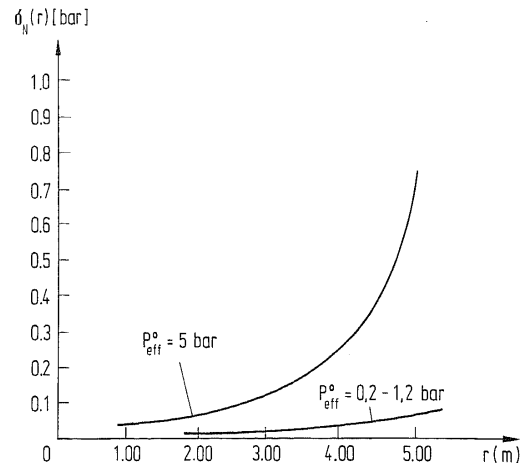


Bild 4. Auftriebsdruck in Abhängigkeit vom effektiven Verpreßdruck und dem Ausbreitradius

Fig. 4. Relationship between uplift pressure and effective injection pressure and tributary radius

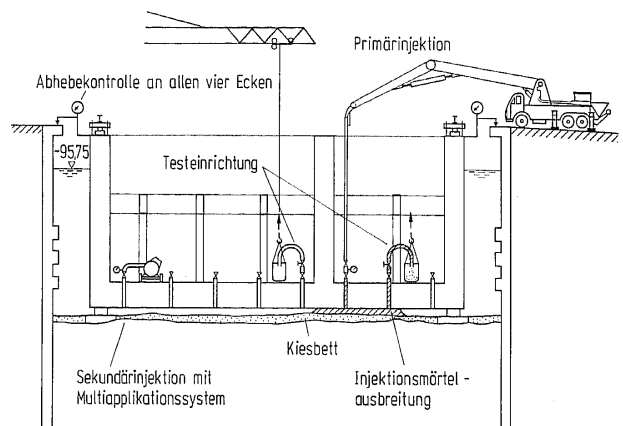


Bild 5. Injektionsschema

Fig. 5. Injection scheme

2.3 Zusammenfassung

Für das Injizieren unter Wasser unter der Bedingung, daß der Abhebedruck von $\sigma_n \leq 0,2$ bar nicht überschritten wird, muß das Injektionsgut folgende Voraussetzung erfüllen:

- 1) Der gewählte W/Z-Gehalt und der Betonverflüssiger garantieren die Konsistenz eines dünnbreiigen Mörtels mit optimaler Fließfähigkeit, ohne daß eine Entmischung unter Wasser zu befürchten ist.
- 2) Der Luftporenbildner entwickelt ein Mikroporensystem, das die innere Reibung der Monosandkörner untereinander nochmals neben dem Zementleim als Lubrikationsmittel mindert.
- 3) Großhubige Förderpumpen garantieren eine kontinuierliche Großmengenförderung mit geringem Druck.
- 4) Das durch Verflüssiger, Verzögerer und Luftporenbildner bedingte Schwinden unter Wasser wird durch die Quellwirkung des Bentonits ausgeglichen.

Diese Voraussetzungen werden durch die Mörtelmischung Mix 3 ausreichend erfüllt. Die Mörtelmischung Mix 4 wurde nur zum Nachinjizieren vorgesehen.

3 Injektion unter dem Bauwerk

Ein Primär- und Sekundärinjektionsrohrsystem von 50 mm Durchmesser Kugelhkopfventilen wurde gemäß Bild 5 in der

Bodenplatte installiert. Die Primärinjektionen wurden von einer LKW-Pumpe ausgeführt.

Die Verpreßdrücke wurden mit einem Manometer am Verpreßrohr gemessen. Der vorhandene hydrostatische Wasserdruck mußte um den durch Tests ermittelten effektiven Verpreßdruck (P_{eff}^0) erhöht werden [1]. Das Abheben der Pumpstation wurde durch Meßfühler an allen vier Ecken kontrolliert.

Die Injektion wurde gemäß Bild 5 durchgeführt. An jeder Injektionsstelle wurde Material bis zu einem Absolutdruck von ca. 2,9 bar injiziert. Um die Injektionsstelle herum wurden alle Injektionsanschlüsse kreisförmig durch ein transparentes Plastikrohrsystem kontrolliert. Sobald dickflüssiges Injektionsgut aufstieg, war dieser Anschluß erfolgreich injiziert. Diese Kontrolle wurde um jede Injektionsstelle radial nach außen hin fortgesetzt, bis nur noch Wasser austrat. Die nächste Injektionsstelle wurde an der Ausbreitungsfläche der vorherigen angesetzt. Somit konnte, bedingt durch den Verzögerer von ca. 12-14 Stunden bei einer Wassertemperatur von 15 °C, frisch in frisch injiziert werden, ohne der Gefahr, kleine Wasserpfützen einzuschließen, ausgesetzt zu sein.

Der Injektionsvorgang wurde spiralförmig und flächendeckend von der Mittelwand aus beginnend unter der Pumpstation ausgeführt. Taucher kontrollierten das Austreten des

Mörtels durch den Spalt am äußeren Rand der Pumpstation. In diesen austretenden Mörtel wurde eine Grobkiesbarriere um die Pumpstation aufgeschüttet. Zum kraftschlüssigen Kontakt des Mörtels mit der Bodenplatte des Bauwerks am Rand wurden nun alle an der Außenwand befindlichen Injektionsstellen im Umlaufsinn gegen die Kiesbarriere verpreßt. Dies war notwendig, um ein freies Auslaufen des Mörtels aus dem Spalt zu verhindern. Das Verpressen wurde innerhalb von 56 Stunden durchgeführt. Insgesamt wurden in den 20-30 cm breiten Spalt ca. 500 m³ Mörtel verpreßt.

Es wurde ausschließlich die Mörtelmischung Mix 3 (Tabelle 1) verwendet. Die Operation verlief ohne Probleme und ohne Verstopfen der Zuführungsleitungen.

Literatur:

- [1] Girmscheid, G., und Stamm, R.: Schwimmend hergestellte Pumpstation: Bauausführung. Bautechnik 68 (1991), H. 7, S. 217-225.
- [2] Martak, L.: Hochdruckbodenvermörtelung aus grundbautechnischer Sicht. Zement und Beton 31 (1986), H. 2, S. 82-86.
- [3] Stelzl, H.: Anwendung der Hochdruckvermörtelung zur Herstellung neuer Gründungselemente und als Hohlraumsicherung im Tunnelbau. Zement und Beton 31 (1986), H. 2, S. 92-97.
- [4] Baldauf, H., Timm, U., u. a.: Betonkonstruktionen im Tiefbau. Berlin: Ernst und Sohn 1988, S. 464-465.
- [5] Reckling, K.-A.: Mechanik I. Braunschweig: Vieweg 1968.
- [6] Becker, E.: Technische Strömungslehre. Stuttgart: Teubner 1974.
- [7] Zement-Taschenbuch 1979/80. Wiesbaden: Bauverlag 1979.