

EINSATZ DER 2D-PIV-MESSTECHNIK ZUR UNTERSUCHUNG DER STRAHLEINWIRKUNG BEIM DÜSENSTRAHLVERFAHREN

**Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe Graw, Dipl.-Ing. Niels Jagsch,
Dipl.-Ing. Henriette Katscher, Dipl.-Ing. Michael Kelm**

Grundbau und Wasserbau, Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät,
Marschnerstr. 31, D-04109 Leipzig, Telefon: +49 (341) 97 33 831, Telefax: +49 (341) 97 33 839

Zusammenfassung

Das Düsenstrahlverfahren ist eine Methode zur Bodenverbesserung, bei der eine fließfähige Suspension in den Untergrund eingepresst wird, um die Tragfähigkeit des Bodens zu erhöhen oder um bei der Baulückenschließung im innerstädtischen Bereich die bestehende Nachbarbebauung zu unterfangen. Bisher ist es nicht möglich, die Reichweite des Düsenstrahls während der Herstellung der Injektionssäulen zu bestimmen. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen einer von der Professur Grundbau und Wasserbau der Universität Leipzig betreuten Diplomarbeit Modellversuche mit einem Particle Image Velocimeter (PIV) durchgeführt. Im Ergebnis der Forschungsarbeit kann die Abhängigkeit zwischen dem Druck des Schneidstrahls und seiner Eindringtiefe in den Bodenkörper für die gewählten Versuchsrandbedingungen eingeschätzt werden.

Summary

Jet grouting is a method used for improving soil conditions. A suspension is pressed into the soil to increase its load-carrying capacity, or to underpin the foundation of surrounding properties, e.g. if gaps between inner city buildings have to be closed. Until now, it is not possible to determine the jet's range while producing the injection columns. Within the framework of a diploma thesis under supervision of the professorship of Geotechnics, Hydrology and Hydraulic Engineering at the University of Leipzig, Germany, model tests with a Particle Image Velocimeter (PIV) were performed. As a result of the experiments, the dependency of the jet's pressure and its penetration depth could be estimated for the chosen conditions.

Gegenstand der Untersuchungen

Das Düsenstrahlverfahren (HDI-Verfahren) ist eine Methode zur Bodenverbesserung und findet bei Abdichtungsmaßnahmen und zur Verfestigung des Baugrunds Anwendung. Es wird eine fließfähige Suspension in den Untergrund eingepresst, um die Tragfähigkeit des Bodens zu erhöhen. Eine typische Anwendung im innerstädtischen Bereich ist es, die bestehende Nachbarbebauung bei Baulückenschließungen zu unterfangen.

Bisher ist es nicht möglich, die Reichweite des Düsenstrahls während der Herstellung der Säulen zu bestimmen. Der im Untergrund stattfindende Düsenvorgang kann nicht direkt beobachtet werden, die erzeugten Injektionskörper sind weder sichtbar noch sofort prüfbar. Die Vorhersage des zu erwartenden Säulendurchmessers basiert auf Schätzungen.

In Modellversuchen mit einem Particle Image Velocimeter (PIV) wurde die Auswirkung des Schneidstrahldruckes auf die Eindringtiefe des Strahls und die Ausbreitung des strahlinduzierten Strömungsfeldes untersucht. In diesem Zusammenhang wurde ferner der Einfluss der Modellbegrenzungen auf das Strömungsfeld beurteilt.

Die Untersuchungen wurden mit einem „Standard-PIV-System“ mit veränderter Beleuchtung und einem eigens für diesen Anwendungsfall entwickelten Versuchsaufbau durchgeführt. Es galt ein Modell zu entwerfen, das es erlaubte, den Austritt des Strahls und die durch den Strahl hervorgerufenen Vorgänge im Boden zu beobachten, um anschließend physikalische Gesetzmäßigkeiten ableiten zu können. Ziel der Versuche war es, die Eindringtiefe eines Schneidstrahls in den Bodenkörper in Abhängigkeit vom Strahldruck experimentell zu untersuchen und die Form des strahlinduzierten Strömungsfeldes mit Hilfe einparametrischer mathematischer Näherungen zu beschreiben sowie den Einfluss der Modellbegrenzungen auf das Strömungsfeld abzuschätzen.

Versuchseinrichtung

Im Rahmen einer von der Professur für Grundbau und Wasserbau der Universität Leipzig betreuten Diplomarbeit [Kelm, 2004] wurden die Versuche im halbtechnischen Maßstab durchgeführt: Die maschinentechnischen Parameter wurden soweit reduziert, dass gerade noch eine deutliche Schneidwirkung des Düsenstrahls erzielt wurde. Aufgrund der geringen Reichweite des Strahls konnten die Abmessungen des im Versuch abzubildenden Bodenbereichs erheblich kleiner als im Großversuch gewählt werden [Gruppe Geotechnik Graz, 2000].

Um eine durchgängig gute Beobachtbarkeit des Strahleintritts in den Boden und der strahlinduzierten Vorgänge zu gewährleisten, wurde das Gehäuse des Versuchstandes aus Plexiglas hergestellt. Die Abmessungen des Versuchskastens können der Abb. 1 entnommen werden, Abb. 2 zeigt eine fotografische Darstellung des Versuchstandes.

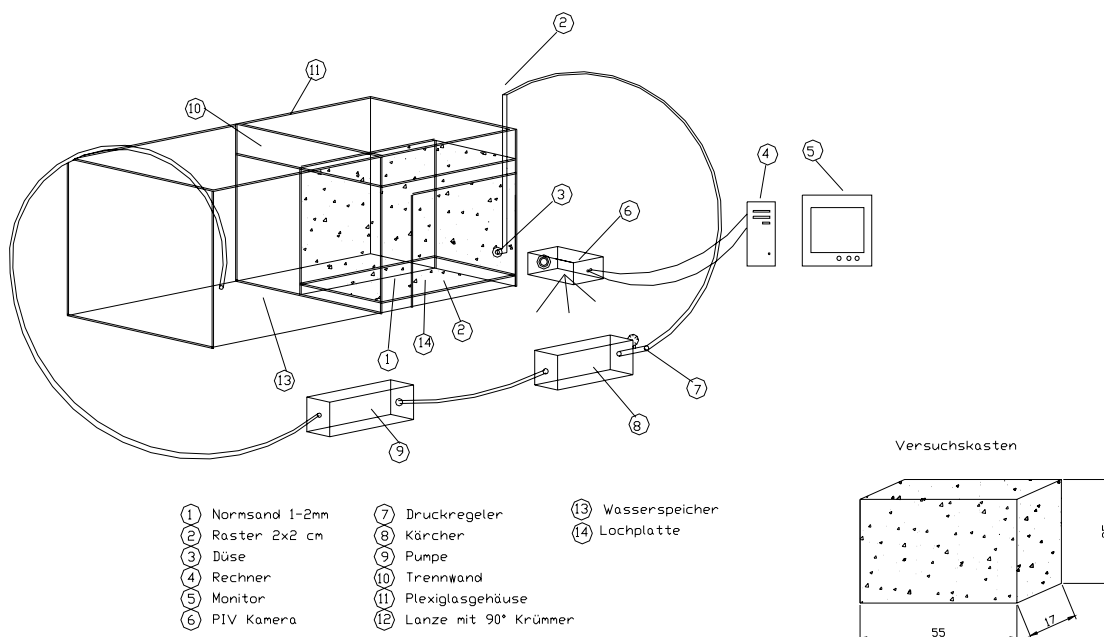


Abb. 1: Versuchsaufbau [Kelm, 2004]



Abb. 2: Versuchsstand [Kelm, 2004]

Als Verpressmedium wurde statt Suspension Wasser verwendet, für den Bodenkörper wurde wassergesättigter Normsand mit der Korngröße 1 bis 2 mm und einer mitteldichten Lagerung (Lagerungsdichte: 0,5) genutzt. Der Wasserdruck wurde über einen Hochdruckreiniger (Kärcher) mit einer maximalen Leistung von 130 bar geregelt. Als Verpressdrücke wurden 60 bar, 80 bar, 100 bar und 120 bar gewählt. Darauf abgestimmt kam eine 1 mm-Düse zur Anwendung.

Für die Aufzeichnung des Strömungsfeldes wurde das PIV-System der Professur für Grundbau und Wasserbau der Universität Leipzig genutzt. Zur Aufzeichnung der Versuche diente eine TSI-PIVCAM 10-30 Hochleistungs-PIV-Kamera mit schneller Doppelbildfolge (30 Bilder pro Sekunde), als Software zur Auswertung der Aufnahmen wurden die Programme Insight und Tecplot verwendet.

Um das vorhandene PIV-System für die Untersuchung des Bodenkörpers einsetzen zu können, war es zuvor an die konkreten Erfordernisse der Versuche anzupassen. Da es sich bei dem zu untersuchenden Medium um Boden handelte, konnte die Sichtbarmachung des Strömungsfeldes nicht mit einem Laserstrahl erfolgen. Stattdessen kamen zwei Blitzlichter zum Einsatz, deren Blitzfrequenz auf die Bildfrequenz der Kamera abzustimmen war. Darin bestand die eigentliche Schwierigkeit des Versuchsaufbaus. Mit dem verwendeten Synchronizer konnte keine exakte Synchronisation von Kamera und Blitzlichtern erreicht werden. Durch Integration eines zusätzlichen Impulsverstärkers in den Versuchsstand wurde es möglich, einen hinreichenden Teil der Aufnahmen auszuwerten.

Ergebnisse der Untersuchungen

Der durch den Düsenvorgang hervorgerufene Boden-Wasser-Kreislauf lässt sich wie folgt beschreiben: Der anstehende Boden bewegte sich in Düsrichtung vorwärts und in Richtung des geringsten Widerstandes – im verwendeten Modell war dieser in vertikaler Richtung nach oben hin gegeben – zurück zur Düse, um anschließend im Bereich der Düse wieder eingezogen und erneut nach vorne transportiert zu werden.

Mit allen getesteten Druckstufen wurden – nach unterschiedlichen Zeiten – gleiche Eindringtiefen beobachtet. Die größten Eindringtiefen wurden in der Anfangsphase des Versuchs, in der zunächst eine Verdichtung des Bodens durch den Strahl stattfand, erfasst. Dabei erreichte der Strahl umso schneller die größte beobachtbare Eindringtiefe, je höher der angelegte Düsdruck war. Erst nach der Verdichtung war eine Schneidwirkung des

Strahls im Boden zu erkennen. Für die untersuchten Druckstufen wurde anhand der Versuche gezeigt, dass die Ausbildung des oberen Wirbels umso ausgeprägter stattfindet, je größer die Eindringtiefe des Schneidstrahls ist. Bei steigender Eindringtiefe nahm die vertikale Strömungsgeschwindigkeit ab, während die horizontal gerichtete Rückflussgeschwindigkeit sich erhöhte.

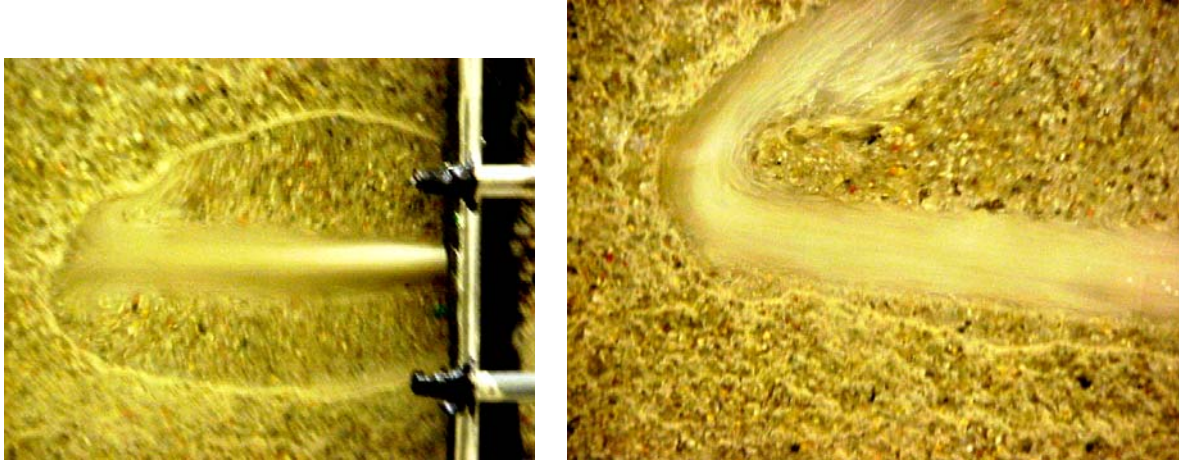


Abb. 3: Boden-Wasser-Walze und Strahlableitung [Kelm, 2004]

Ergebnisse der PIV-Messungen

Nachdem die Synchronisierung der Kamera mit den Blitzlichtern zufriedenstellend gelungen war, konnte mit dem PIV-System problemlos die Bewegung der Bodenteilchen verfolgt werden. Bei einigen Bildern sind Reflexionen durch Schrauben im Randbereich aufgetreten. Die Kamera registrierte die Reflexionen als Bewegung, was wiederum zur Verfälschung der Ergebnisse im Randbereich führte. Außerdem muss beachtet werden, dass der Bereich von Düsenausgang bis zur Messung nicht aufgezeichnet werden konnte. Dieser Bereich ist 1 cm breit und wird durch eine Plexiglasplatte verdeckt.

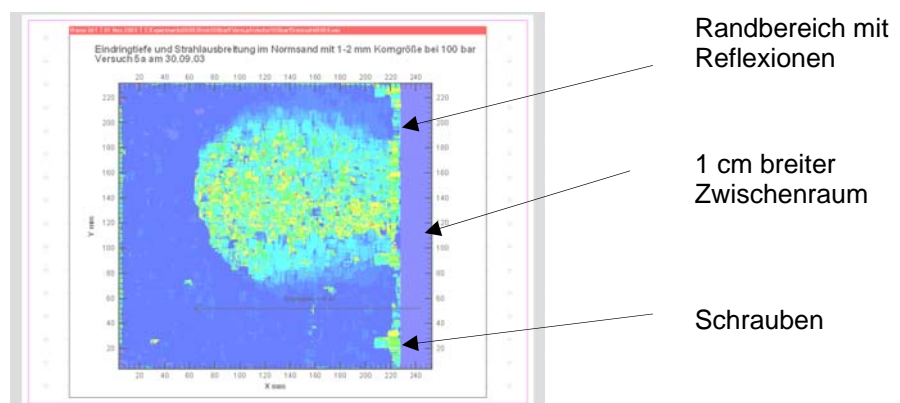
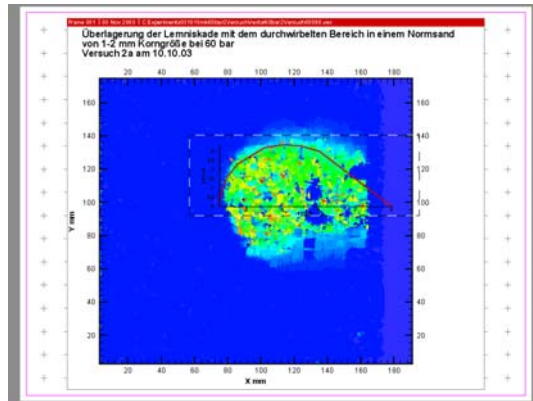
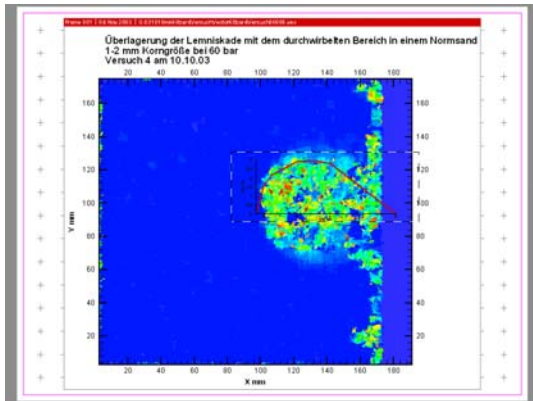
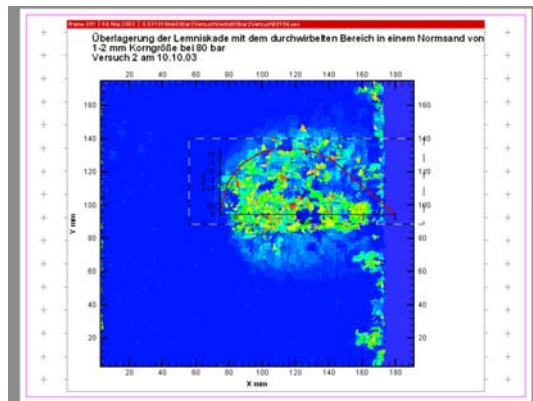
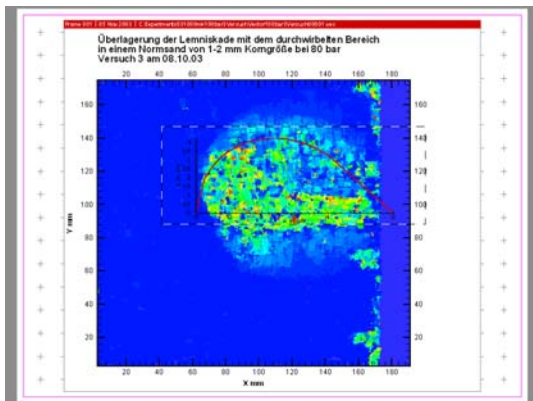


Abb. 4: Auftretende Reflexionen im Randbereich [Kelm, 2004]

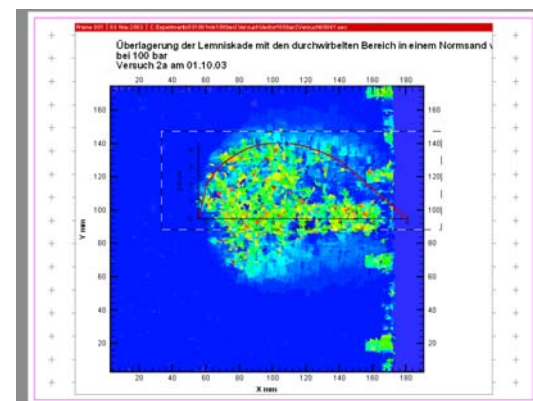
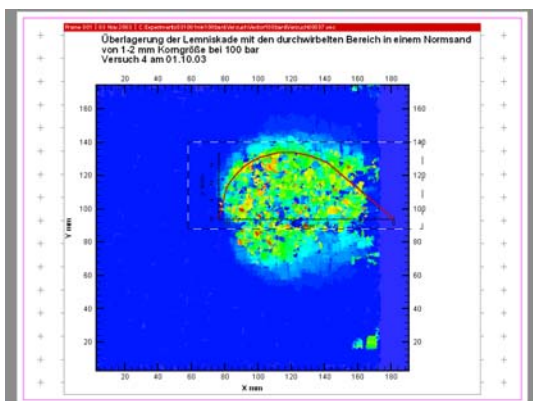
In Abb. 5 sind beispielhaft jeweils 2 Versuchsbilder mit den Druckstufen von 60, 80, 100 und 120 bar aus verschiedenen Versuchsreihen dargestellt.



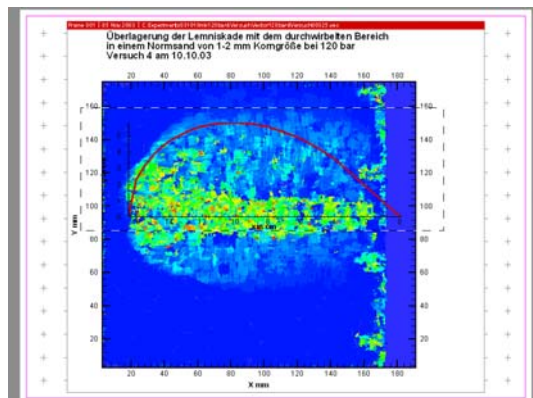
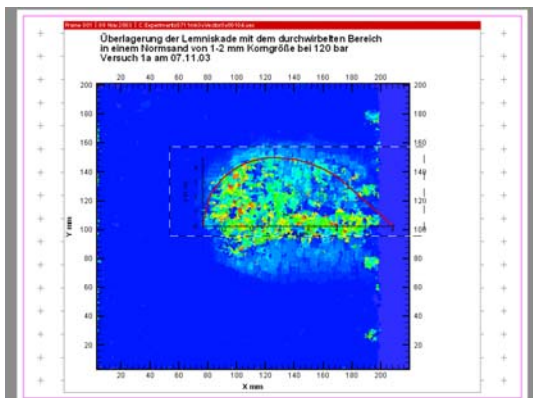
Versuche bei 60 bar:



Versuche bei 80 bar:



Versuche bei 100 bar:



Versuche bei 120 bar:

Abb. 5: Auswertung bei unterschiedlichen Druckstufen [Kelm, 2004]

Fazit

Im Ergebnis der durchgeführten Versuche hat sich gezeigt, dass der Einsatz des PIV-Systems über die herkömmliche Art der Anwendung [Lengricht, Graw, 2001] hinaus möglich ist. Mit diesem Beitrag soll darauf aufmerksam gemacht und zur Entwicklung neuartiger Anwendungsformen des PIV-Prinzips angeregt werden, um die Erschließung weiterer Einsatzbereiche der Particle Image Velocimetrie voranzutreiben.

Dankesworte

Ein spezieller Dank sei an dieser Stelle sowohl Herrn Kronewetter von der Firma TSI, der den Diplomanden bei der „Umkonstruktion“ des PIV-Systems jederzeit mit Rat und Tat unterstützt hat, als auch den Elektrotechnikern der HTWK ausgesprochen, die die Ansteuerung gebaut haben.

Literatur

Gruppe Geotechnik Graz; 2000: Düsenstrahlverfahren – Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung, in: G. Riedmüller, W. Schubert, S. Semprich (Hrsg.): Beiträge zum 15. Christian Veder Kolloquium, Heft 7, Technische Universität Graz

Kelm, Michael; 2004: Untersuchung zur Strahleinwirkung beim Düsenstrahlverfahren, Diplomarbeit, Professur Grundbau und Wasserbau, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Universität Leipzig

Lengricht, J.; Graw, K.-U. ; 2001: Particle Image Velocimetrie zur Analyse von Grundwasserbewegungen und deren Wechselwirkungen mit Beobachtungsbrunnen, 9. Fachtagung GALA Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Winterthur