*Adrian Kainrath, Dipl.-Ing., Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien (A)*
*Dietmar Adam, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn., Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien (A)*
*Kurt Kogler, Ing., Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H., Wien (A)*

# Neue Erkenntnisse aus Großversuchen mit Niederdruckinjektionen zur Verfestigung von Lockergestein

**Niederdruckinjektionen im Lockergestein stellen ein bewährtes Verfahren zur Verbesserung von Lockergesteinsböden dar. In der Praxis ergeben sich jedoch immer wieder Probleme bei der Probennahme sowie beim Nachweis des Injektionserfolges. Speziell der Nachweis der Festigkeit des injizierten Materials bereitet vielfach Probleme. Aus diesem Grund wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes an der TU Wien Großversuche zur Injektion von alluvialen Kiesböden ausgeführt. Dabei konnten wesentliche Erkenntnisse im Hinblick auf den Nachweis des Injektionserfolges gewonnen werden. Zudem wurden erstmals dank spezieller Verfahren prüffähige Injektionskörperproben gewonnen und bodenmechanisch untersucht.**

## 1 Einleitung

Niederdruckinjektionen werden im Tiefbau vornehmlich zur Verringerung der Durchlässigkeit und Verfestigung von Lockergestein eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird Injektionsgut mit geringem Druck über spezielle Manschettenrohre in den Boden eingebracht, mit dem Ziel, die im Boden vorhandenen Poren und Hohlräume zu verfüllen. Durch die geringen Injektionsdrücke kommt es zu keinen ungewollten Auflockerungen und Strukturänderungen im Boden, lediglich die Eigenschaften des Bodens werden verbessert (siehe **Bild 1**). Im Vergleich zu anderen Bauverfahren, wie z. B. dem Düsenstrahlverfahren, ermöglichen Niederdruckinjektionen eine äußerst ressourcenschonende und kosteneffiziente Verbesserung der Eigenschaften von Lockergesteinsböden (siehe **Bild 2**).

Bislang stehen der Bauindustrie allerdings nur unzureichend Instrumente und Verfahren zur Bemessung und zum Nachweis von Injektionsmaßnahmen zur Verfügung. Speziell die Gewinnung von Proben aus dem Injektionskörper stellt ein großes Problem dar. Aus diesem Grund existieren kaum Daten zu Festigkeiten von injizierten Böden. Die Folge sind Unsicherheiten und Unwägbarkeiten auf Seite der Planer. Aus diesem Grund wurde von der Firma Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H gemeinsam mit dem Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien im Jahr 2012 ein Forschungsprojekt initiiert, um neue Entwicklungen im Bereich der Injektionstechnik voranzutreiben. Die Ziele des Forschungsprojektes wurden auf Basis der beschriebenen Ausgangssituation folgendermaßen definiert:

- Evaluierung bestehender und Entwicklung neuer praxistauglicher Prüfverfahren für Injektionsgut,
- Entwicklung von Prüfmethoden zur Ermittlung bodenmechanischer Kennwerte für injiziertes Lockergestein.

Um die gestellten Forschungsfragen zu lösen, baute das durchgeführte Forschungsprojekt auf einer Kombination aus

*Bild 1 Mit Zementsuspension injizierter sandiger Kies*

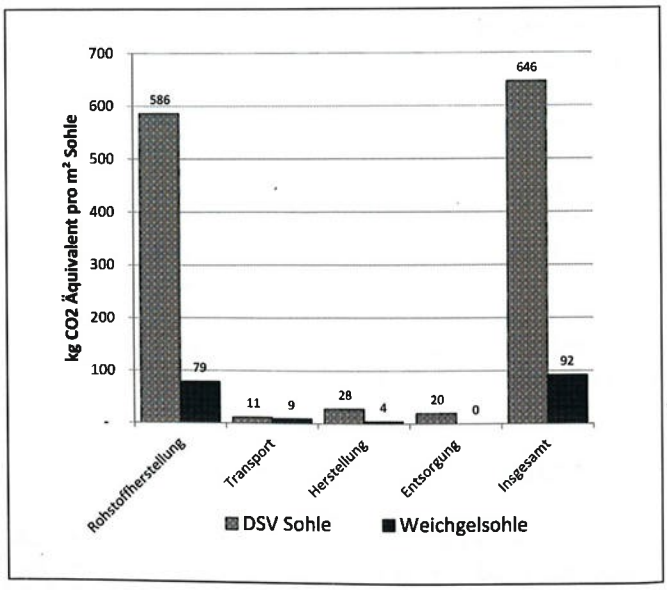



*Bild 2 Vergleichende $CO_2$-Bilanz einer Weichgel- und einer DSV-Sohle [2]*

*Bild 3 Großversuch: links: Versuchsaufbau; Mitte: Innenansicht mit Drainagesystem; rechts: Innenansicht während dem Materialeinbau*

Labor- und Feldversuchen auf. Im Rahmen der Laborversuche wurden in der Anfangsphase des Projektes grundlegende Untersuchungen an einer großen Bandbreite unterschiedlicher Zementsuspensionen [3, 4, 5] durchgeführt und daraus Prüfempfehlungen festgelegt, die im „Kommentar zur EN 12715" der Österreichischen Geomechanischen Gesellschaft (ÖGG) [1] Eingang fanden. Aufbauend auf den Daten der grundlegenden Untersuchungen wurden im Labor künstliche Injektionskörperproben aus Sanden und Kiesen hergestellt und weiterführend bodenmechanisch anhand von Triaxialversuchen und einaxialen Druckversuchen untersucht. Daraus konnten grundlegende Einflüsse auf die Festigkeit von Injektionskörperproben abgeleitet werden [4]. Das Forschungsprojekt umfasste drei Injektions-Großversuche, auf deren Ausführung und Ergebnisse in diesem Beitrag näher eingegangen wird.

## 2 Beschreibung und Ziele der durchgeführten Großversuche

Die Problematik bei Injektionen zur Verfestigung von Lockergestein bestand darin, dass es bislang kaum möglich war, prüfbare Injektionskörperproben aus dem Untergrund zu gewinnen und somit den Nachweis über den Injektionserfolg zu erbringen. Aus diesem Grund existieren nahezu keine Daten zu Festigkeitseigenschaften von injizierten Böden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Großversuche an natürlichen Böden (weitgestufte sandige Kiese) durchgeführt. Das Ziel dieser Versuche war neben der Probengewinnung auch neue Erkenntnisse über die Vorgänge im Boden während der Injektion zu generieren und Methoden zum Nachweis des Injektionserfolges zu testen. Das Freilegen der Injektionskörper ermöglichte dabei die Überprüfung der Ergebnisse.

### 2.1 Versuchsaufbau der Großversuche

Für die Ausführung der Großversuche wurde eine flexible Lösung entwickelt, bei der ein 6-Zoll-Standard-Abrollcontainer mit einem massiven Stahlrahmen verstärkt und erhöht wurde. In den Container wurden Drainageleitungen und ein Rohrsystem zur Steuerung des Grundwasserspiegels eingebaut. Die einfache Demontage der Seitenteile des Verstärkungsrahmens erlaubte einen einfachen Einbau des Bodens, sowie eine gute Zugänglichkeit des freigelegten Injektionskörpers. In **Bild 3** ist der Versuchsaufbau dargestellt.

### 2.2 Materialien

Für die drei Großversuche wurden zwei unterschiedliche Materialien verwendet, wobei bei einem Material die Einbaudichte im Zuge der Versuche bewusst variiert wurde. Bei beiden Materialien handelt es sich um sandige Kiese, die typische alluviale Böden in Österreich darstellen. Als Injektionsgut kam bei allen Versuchen ein Portlandzement vom Typ CEM I 52,5R mit

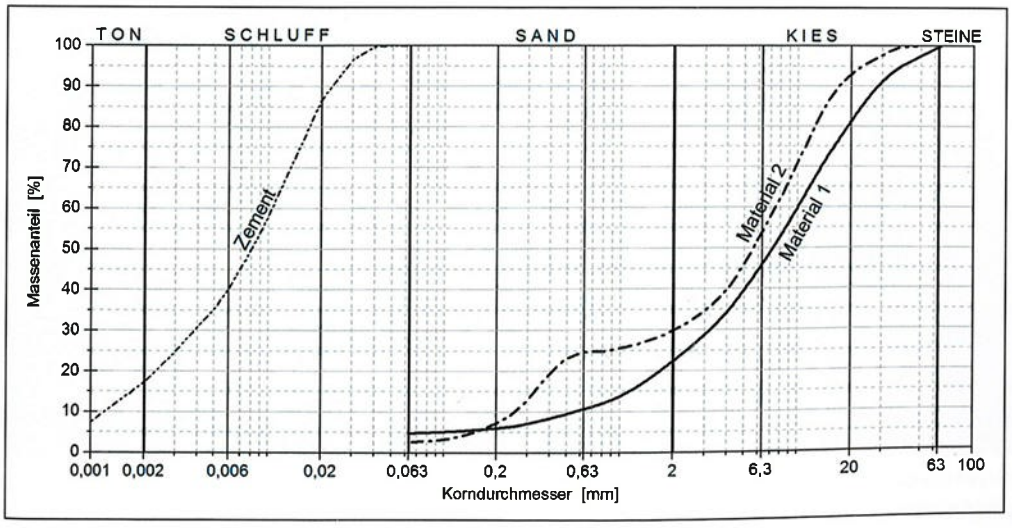
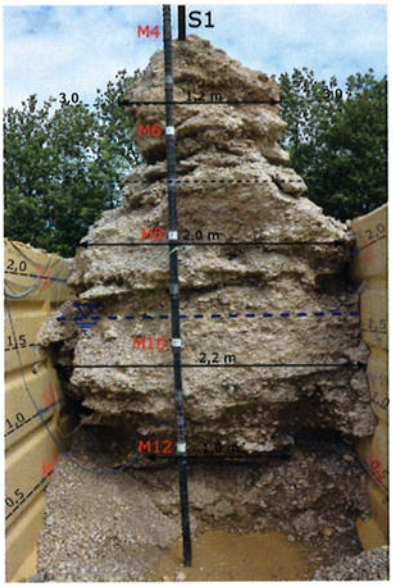



*Bild 4 Kornverteilungslinien der verwendeten Materialien*



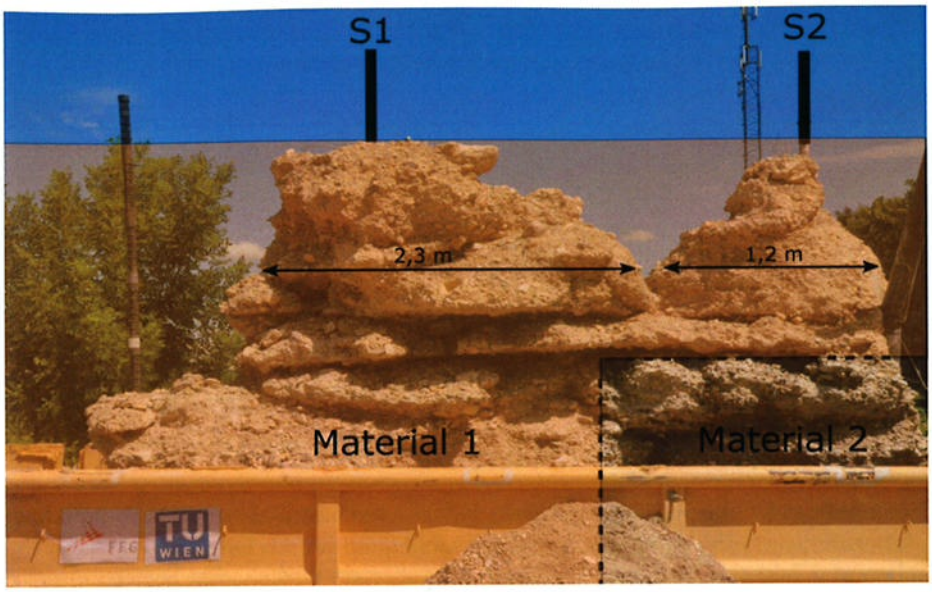




*Bild 5 Freigelegter Injektionskörper*

einem Wasser-Zementwert von 1,0, stabilisiert mit 2 % Bentonit, zur Anwendung. Die Kornverteilungslinie der verwendeten Materialien sowie des Zementes sind in **Bild 4** dargestellt.

Das Material wurde im Container händisch eingebaut und mittels Vibrationsstampfer und Rüttelplatte verdichtet. Der Grundwasserspiegel im Container wurde nach dem Materialeinbau über die Drainageleitungen am Containerboden gesteuert. Der Bohrvorgang wurde durch den Einbau von Hüllrohren, die nach dem Materialeinbau gezogen wurden, simuliert. Der Ringraum um die Manschettenrohre wurde mit einer Mantelmischung geringer Festigkeit aufgefüllt. Die Injektion selbst erfolgte danach unter Aufzeichnung der relevanten Parameter (Druck und Menge). Nach einer Aushärtezeit von mehreren Tagen wurde der Injektionskörper händisch mittels Wasserstrahl freigelegt. **Bild 5** zeigt den freigelegten Injektionskörper. Im Bereich von Material 1 wurde ein sehr homogener Injektionskörper angetroffen, wobei Reichweiten von über 1,5 m problemlos erreicht wurden. Im Bereich von Material 2 bildeten sich lediglich stark verfestigte fächerartige Strukturen aus. Die Bereiche zwischen den Fächern wurden durch das Injektionsgut nicht penetriert. Die verpressten Mengen betrugen bei Säule 1 rund 1,1 m³ Suspension und bei Säule 2 rund 0,8 m³ Suspension. Mit der bei Säule 1 verpressten Menge konnte eine Kubatur von rund 7 m³ verfestigt werden.

## 2.3 Untersuchungen zum Nachweis des Injektionserfolges

Im Zuge der Versuche wurden Methoden und Ansätze zur Probeentnahme aus dem Injektionskörper untersucht. Es konnte dabei nachgewiesen werden, dass selbst bei außerordentlich gut verfestigtem injiziertem Lockergestein keine Gewinnung von Bohrkernen möglich war. Aufgrund der schwachen Bindung der größeren Einzelkörner kam es durch den Bohrvorgang zum Auslösen der Körner aus dem Gefüge, welche nachfolgend durch die Rotation den gesamten Kern zerstörten. **Bild 6** zeigt das Ergebnis einer Kernbohrung in stark verfestigten Bereichen.

*Bild 6 Probenentnahme aus dem Injektionskörper mittels Kernbohrung*
*links: Kernbohrgerät; rechts: Aufgelöstes Korngefüge in einem an sich stark verfestigten Bereich*

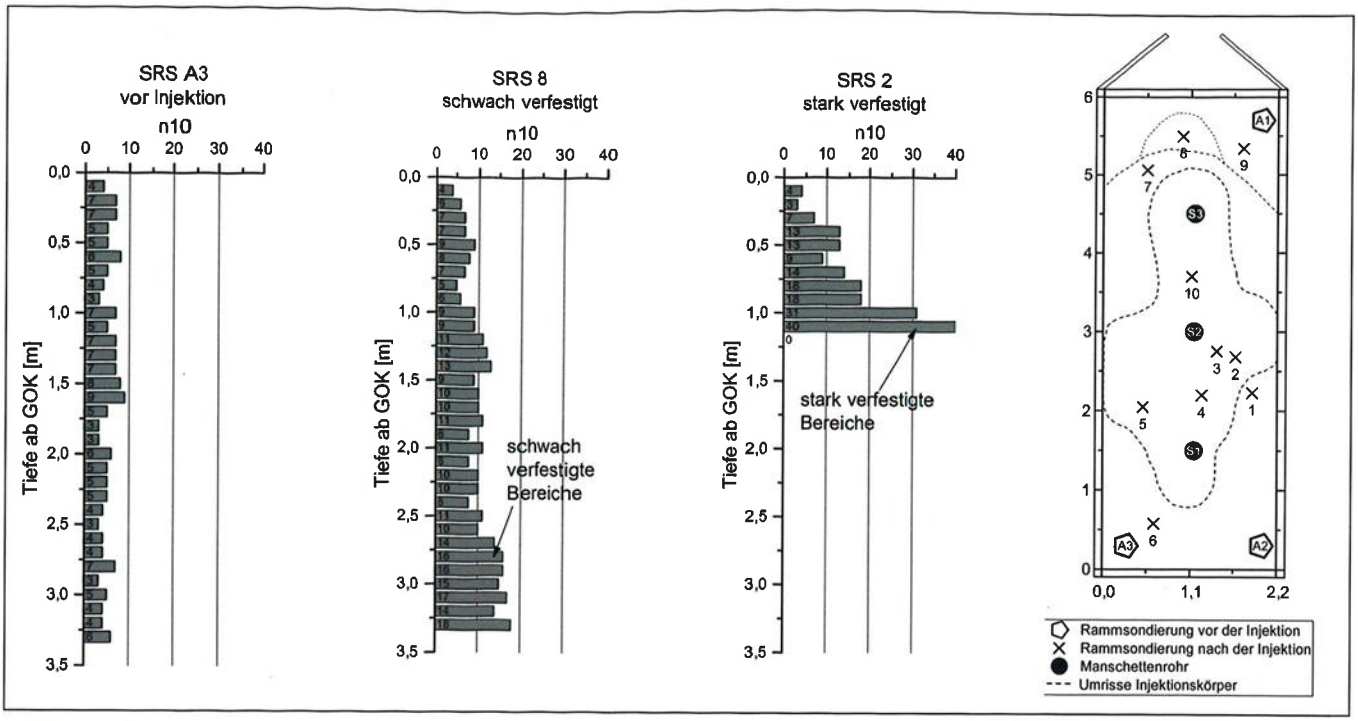



*Bild 7 Ergebnisse der Rammsondierungen zum Nachweis der Reichweite der Injektionsgutausbreitung*

Ebenfalls untersucht wurde, ob Rammsondierungen ein geeignetes Mittel zum Nachweis der Reichweite der Injektionsgutausbreitung sind. Es wurden dafür Rammsondierungen vor und nach erfolgter Injektion durchgeführt. In **Bild 7** sind exemplarisch die Auswertungen der Sondierungen vor und nach der Injektion in unterschiedlich verfestigten Bereichen dargestellt.

Die Versuche haben gezeigt, dass sich Rammsondierungen unter bestimmten Einschränkungen zum Nachweis des Injektionserfolges eignen. Bei gering verfestigten Bereichen kommt es zu einer Erhöhung der Schlagzahlen. In den stark verfestigten Bereichen ist kein Eindringen der Rammsonde mehr möglich, so dass eine Aussage über die darunter liegenden Bereiche nicht mehr möglich ist. Die Anwendbarkeit zur Ermittlung der Injektionsreichweite ist prinzipiell gegeben. Einschränkungen in der Aussagekraft ergeben sich durch feinkornarme Schichten im Untergrund, die durch die Injektion stark verfestigt sind, Claquagen und Inhomogenitäten im Boden. In den Randbereichen des Injektionskörpers ist zudem mit einer starken Abweichung der Rammsonde vom Lot zu rechnen. Um eine genaue Aussage über die Reichweite treffen zu können, ist auf jeden Fall eine größere Anzahl an Versuchen vorzusehen.

## 2.4 Probengewinnung aus dem Injektionskörper

Die Probeentnahme aus dem Injektionskörper gestaltet sich speziell für die Bodenart der sandigen Kiese äußerst schwierig bis nahezu unmöglich. Da keine Proben durch Kernbohrungen gewonnen werden konnten, wurden Bruchstücke aus dem Injektionskörper geschrämt und im Labor zu Prismen geschnitten und daran die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt. Für die weiteren Großversuche wurden im Labor weiterführende Grundsatzversuche mit verschiedenen Versuchskörpern (Filterrohre, Lochblechrohre, Netze etc.) durchgeführt, um ein System zu finden, das es ermöglicht, zylindrische Proben aus dem Injektionskörper zu gewinnen. Dabei wurden mit dünnwandigen Stahl-Lochblechrohren und Filterrohren sehr gute Ergebnisse erzielt, weshalb diese Technik in weiterer Folge bei

*Bild 8 Probengewinnung aus dem Injektionskörper*
*links: Einbau der Lochblechrohre; Mitte: Ausgebaute Lochblechrohre; rechts: Prüffähige Probekörper*

den Großversuchen zum Einsatz gelangte. Die Rohre wurden dabei während des Materialeinbaus im Container in unterschiedlichen Abständen von der Injektionsstelle eingebaut und der Boden in den Rohren händisch verdichtet. Der Einbau der Rohre sowie die aus dem Injektionskörper gewonnenen Proben sind in **Bild 8** dargestellt. Anhand dieses Systems konnten erstmals prüffähige Zylinderproben aus einem Injektionskörper entnommen und bodenmechanisch untersucht werden.

Der Zementgehalt der Proben wurde anhand einer eigens entwickelten Labormethode, bei der das in den Proben chemisch gebundene Wasser als Indikator herangezogen wird, bestimmt. In **Bild 9** sind die Ergebnisse der ermittelten Festigkeiten in Abhängigkeit vom Zementgehalt für lockere und dichte Lagerung der untersuchten Böden dargestellt. Der Zementgehalt in den Proben variiert dabei von 0,05 bis 0,45 g/cm³, obwohl bei allen Versuchen die gleiche Suspensionsmischung mit einem W/Z-Wert von 1,0 verwendet wurde. Das bedeutet, dass sich der Zementgehalt im Boden durch Sedimentations- und Filtrationseffekte verändert und der tatsächlich im Porenraum vorhandene Zementgehalt über die Festigkeit entscheidet. Die Abbildung zeigt auch, dass das Porenvolumen ebenfalls eine Rolle spielt. Je größer das Porenvolumen, desto größer sind die Abstände zwischen den Bodenkörnern, die durch den Zement überbrückt werden müssen, und desto geringer ist die Festigkeit bei gleichem Zementgehalt.

## 3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Anhand der im Zuge des Projektes entwickelten Methoden konnten erstmals eine hohe Anzahl an prüffähigen Proben aus injiziertem Lockergestein gewonnen werden. Durch die Bestimmung des Zementgehaltes in den Proben konnten dabei Korrelationen zwischen dem Zementgehalt und zu erwartender Festigkeit ermittelt werden, so dass anhand dieser Verfahren in Zukunft auf einfachem Wege grundlegende Aussagen über die Festigkeit von injiziertem Lockergestein gemacht werden können.

Die im Beitrag vorgestellten Untersuchungsergebnisse und Prüfverfahren entstanden im Rahmen eines Forschungsprojektes in Kooperation mit der Firma Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H., das von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) finanziell unterstützt wurde. Der Autor möchte dem gesamten Projektteam für die gute Zusammenarbeit danken.

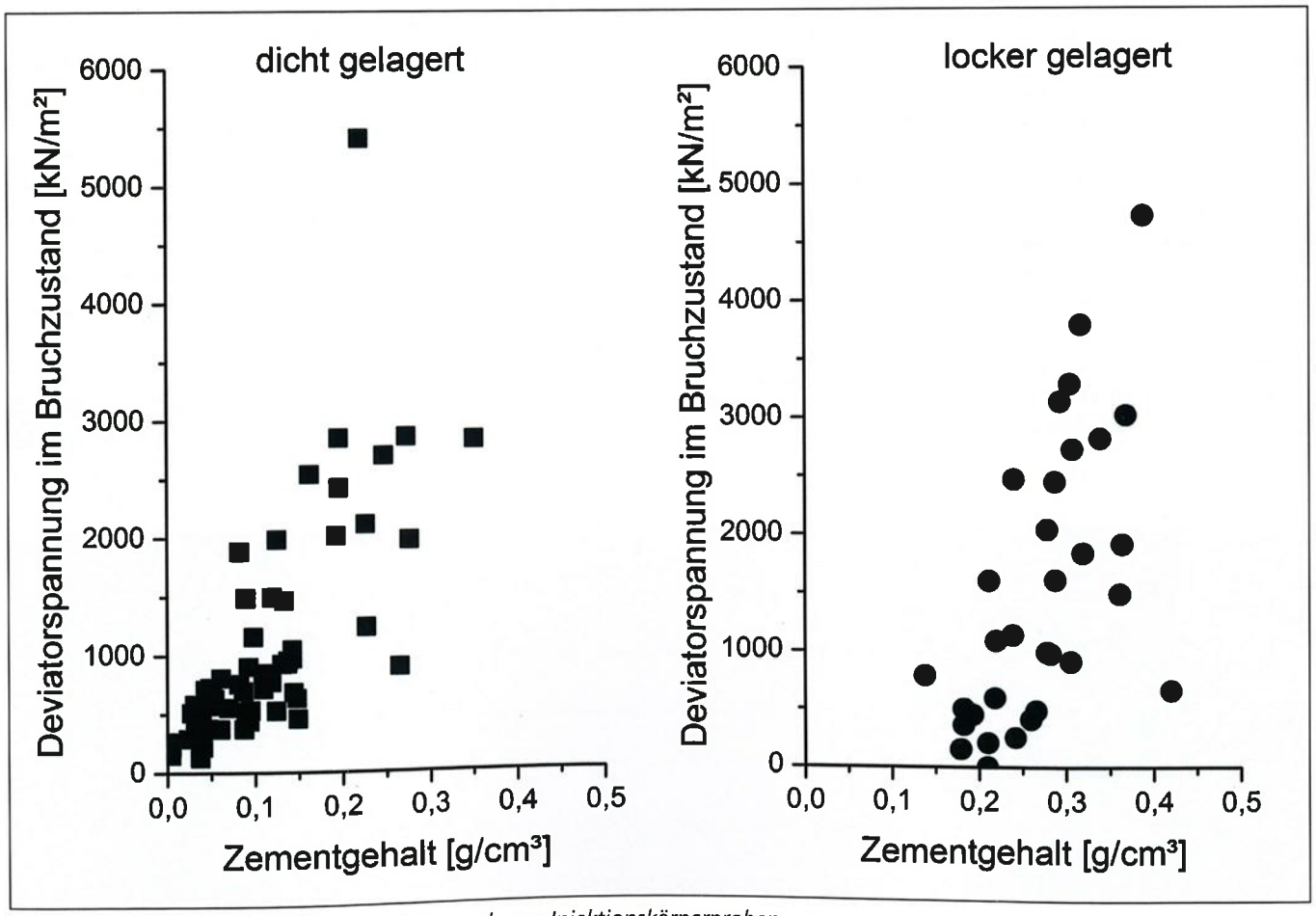



*Bild 9 Ergebnisse der Druck- und Triaxialversuche an Injektionskörperproben links: Böden mit dichter Lagerung; rechts: Böden mit lockerer Lagerung*

## Literatur


[1] Österreichische Geomechanische Gesellschaft (ÖGG): „Kommentar zur EN 12715", 2016

[2] Hornich, W.; Kainrath, A.; Hoffmann J.; Hazay, A.: Injektion im Lockergestein - wirtschaftliches Verfahren bei gleichzeitig minimaler $CO_2$ Belastung, eine vergleichende Analyse anhand eines praktischen Beispiels, in: Architektenverein Ö.Ö.I.-u. (Ed.), 10. Österreichische Geotechnik Tagung, Wien, 2015

[3] Kainrath, A.: Prüfmethoden und neue Verfahren zur Qualitätssicherung in der Injektionstechnik, VÖBU Seminar: Injektionen im Untertagebau, 2012

[4] Kainrath, A.: New Evaluation Methods for Grouts, Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers' Conference: 5th IYGEC 2013, IOS Press, 2013

[5] Kainrath, A.: Endbericht zum Forschungsprojekt: Niederdruckinjektionen im Lockergestein, 2015

[6] Kainrath, A.; Adam, D.: Influencing factors on the mechanical behaviour of grouted soil, XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Edinburgh, 2015

[7] Kainrath, A.; Adam, D.; Krenn, H.: Verfahren zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften zementbasierter Injektionssuspensionen, in: H. Brandl D.A. (Ed.), XV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, ÖIAV Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Wien, 2014

[8] Kainrath, A.; Krenn, H.; Adam, D.: Die Injektionstechnik auf dem Prüfstand, in: 2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik, Eigenverlag Institut für Geotechnik der TU Wien, Wien, 2012