

# Abdichtung von Damm- und Deichkörpern mittels kunststoffbasierter Dichtungssysteme

## Sealing of Dikes and Dams by Injection Grouting of Synthetic Resins

RNDr. Vladislava Kostkanová PhD.<sup>1</sup>, Benjamin Strauß<sup>1,2</sup>, Dr.-Ing. Ulf Helbig<sup>2</sup>, Götz Tintelnot<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden

<sup>2</sup>Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden

<sup>3</sup>TPH Bausysteme GmbH

*Im Beitrag werden Ergebnisse eines praxisbezogenen Projektes vorgestellt, das zur Entwicklung eines Injektionsverfahrens auf Kunststoffbasis für die Abdichtung von Deichen und Dämmen im Wasserbau dient. Die Entwicklung und Optimierung der Injektionstechnologie erfolgt mittels Großversuchen (Höhe Dammkörper ca. 2 m) im Wasserbaulabor. Im Bodenmechanischen Labor werden die mechanischen Eigenschaften, vor allem einaxiale Druckfestigkeit, Durchlässigkeit und Scherfestigkeit, an Proben bestimmt und ausgewertet, die direkt aus Injektionskörpern im Großversuch gewonnen werden.*

*The results of the practice-oriented project are presented in this paper. The intention of the project is to contribute to optimising the injection grouting process for the sealing of dikes and dams. Injection grouting is being optimised on a 2 m height model dam in the Hydraulic Laboratory. The mechanical behaviour of the samples from injected (grouted) bodies is being investigated in the Soil Mechanics Laboratory. This behaviour – especially compressive strength, permeability and shear strength – is being evaluated according to the position of the samples, the optimisation measures performed and other properties.*

### 1 Einführung Introduction

Zu über 90 % werden bei Deichen und Dämmen aus technologischen und ökonomischen Aspekten unvollkommene Dichtungen hergestellt. D. h. eine absolut 100%-ige Dichtigkeit gegenüber Wasserdurchdringung wird nicht erzielt, jedoch aus technischer Sicht toleriert.

Einen wesentlichen Versagensgrund von Deichen und Dämmen bildet neben der Kontakterosion im Anschlussbereich Erdbauwerk – Massivbauwerk auch der Prozess der Suffosion (z. B. in Saucke, 2006 und Striegler, 1998). Diese Suffosion führt zum Verlust von Feinanteilen im Stützkörper des Absperrbauwerks und zu einer Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit (Erhöhung der effektiven Durchlässigkeit). Dadurch wird das Bodengefüge im Bauwerk geschwächt, die Sickerströmung verstärkt, woraus eine weitere Intensivierung des Suffosionsprozesses eintritt, was final zur röhrenförmigen oder flächigen Kornverlagerung der tragenden Bodenmatrix und bis zum Verlust der Standfestigkeit und letztlich zum Versagen des Deiches oder Dammes führt. Im Extremfall bilden sich sogar komplette Erosionsröhren (sog. „Piping“), die Böschungsrutschungen oder bei tiefreichenden hydraulischen Konnektivitäten Grundbrüche auslösen und damit ein frühzeitiges Versagen des Deich- bzw. Dammbauwerks herbeiführen können.

Projektziel ist es, für die o. g. Schwachstellensituationen ein kompaktes und effektives Abdichtungsverfahren sowie eine Methodik zu entwickeln, die durch den Einsatz von Kunststoffen ein gleich- oder sogar höherwertiges Abdichtungsniveau in Damm- und Deichkörpern im Vergleich zu anderen, bereits bekannten Abdichtungsverfahren (z. B. in Witt, 2009) bzw. zum Neubau ermöglichen. Hierbei stehen auch ein reduzierter technologischer und finanzieller Aufwand im Vordergrund. Letztlich soll es bereits im Einstau mit Sickerlinienbildung möglich werden, durch ein mobiles Verfahren gefährdete Stellen schnell und als Sofortmaßnahme zu sichern und somit ein potenzielles Versagen (Bruch, Überschwemmung) durch fortschreitende Durchsickerung und folglich Erosion/Suffosion zu verhindern.

Das Abdichtungsverfahren beruht auf der Injektionstechnologie und basiert auf dem Einsatz von Kunststoffgelen. Der Schwerpunkt liegt besonders auf der Beseitigung von Leckagen in Dichtungen, den Anschlussbereichen zwischen Erd- und anschließendem Massivbauwerk sowie Querungen.

Hierzu werden Materialkomponenten entwickelt, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung für eine Abdichtung des Untergrundes in Lockersedimenten grundsätzlich geeignet sind, da sie unabhängig von vorhandener Bodenfeuchtigkeit oder anstehendem Wasser chemisch ausreagieren und somit eine Dichtung auch unter Wasser bzw. im stark durchfeuchteten Erdreich ausbilden können. Weiterhin erfolgen die Entwicklung und Optimierung der Injektionstechnologie sowie deren Erprobung im Großversuch im Maßstab 1:1.

Gemäß Kutzner (1991) sind folgende Voraussetzungen für eine ausreichende Penetration des Injektionsmittels im Untergrund erforderlich:

- Ausreichender Injektionsdruck,
- hydraulische Verbindung der Porenräume zum Injektionspunkt sowie miteinander,
- ausreichend große Hohlraumabmessungen, um das Eindringen des Injektionsmittels zu ermöglichen.

Die Bedingung eines ausreichenden Injektionsdrucks ist im Fall von Deichen und Dämmen schwierig realisierbar. Die niedrige Überlagerung führt dazu, dass der erforderliche durch Bodeneigengewicht verursachte Gegendruck fehlt und die an der Injektionseinheit eingestellten Injektionsdrücke im Boden sehr zügig sinken, was bei oberflächennahen Schichten zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Injektionsmittels führt. Die Entwicklung der Injektionsmethodik bei niedriger Überlagerung steht daher ebenso im Fokus dieses Vorhabens.

### 1.1 Eigenschaften des Injektionsmittels *Properties of the injection grouting media*

Der eingesetzte Kunststoff ist ein dreikomponentiges, wasserquellfähiges Hydrogel auf Methacrylatbasis, das zu einem gummiartigen, flexiblen Produkt aushärtet. Es ist besonders durch seine extrem niedrige Mischungsviskosität gekennzeichnet, die nah bei der Viskosi-

tät von reinem Wasser liegt (TPH Bausysteme GmbH, 2013). Weiterhin besitzt es die Fähigkeit, im ausgehärteten Zustand zu schrumpfen und zu quellen, was auch seine mechanischen Eigenschaften beeinflusst.

### 1.2 Eigenschaften des Bodens *Soil properties*

Für die Injektions-Großversuche ist ein Sand aus der Sandgrube Dresden-Rossendorf gewählt worden. Es handelt sich um schluffigen Sand (SU) mit ca. 7 % Feinanteil. Die Korngrößenverteilung ist in Bild 1 gegeben. Weil es sich um einen natürlichen Boden handelt, wurde eine leichte Streuung in der Korngrößenverteilung bei einer weiteren, späteren Gewinnung beobachtet, vor allem bei der Zusammensetzung des Feinanteils (7 % bis 12 %).

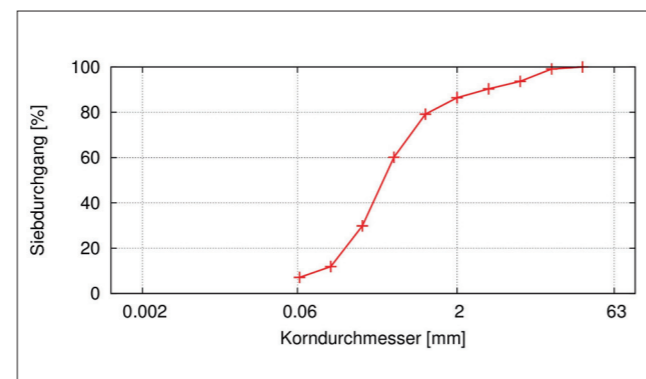


Bild 1: Korngrößenverteilung  
Figure 1: Grain-size distribution curve

## 2 Großversuche *Large-scale tests*

Für die Entwicklung und Optimierung der Injektionsmethodik werden Großversuche im Wasserbaulabor im Maßstab M 1:1 durchgeführt. Die Injektionsversuche erfolgen an einem 2 m hohen Modelldamm aus dem o. g. schluffigen Sand. Die Verdichtungskennwerte der einzelnen Großversuche sind in der Tabelle 1 angegeben. Nach jedem Großversuch werden die Injektionskörper freigelegt, vermessen, skizziert und dokumentiert. Ausgewählte Injektionskörper werden zusätzlich mit einem 3D-Laser-Scanner aufgenommen, wobei deren Volumen bestimmt wird. Zwei Beispiele freigelegter Injektionskörper sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt.



Bild 2: Injektionsergebnis mit Ausbauchung im unteren Bereich und keinem Verbund in oberflächennahen Schichten (GR2)

Figure 2: Non-optimised realisation with bulging in bottom part and without bonding in near-surface layers



Bild 3: Durchgängige, geschlossene Dichtwand (GR3)  
Figure 3: Continuous sealing wall

Bei der technischen Optimierung des Injektionsverfahrens erfolgen verschiedene Modifikationen, um eine Qualitätsverbesserung zu erzielen, wie z. B.:

- Nutzung von seitlich perforierten Lanzen/Lanzen mit unterer Öffnung (verlorene Spitze),
- Variation des Lanzenabstandes (30 cm, 40 cm),
- Variation des vertikalen Abstandes des Injektionshorizontes (10 cm, 20 cm, 30 cm),
- Variation der Menge des Injektionsmittels (50 l bzw. 75 l je laufendem Tiefenmeter),
- 2- oder 3-stufiges Verfahren mit Wartezeiten zwischen den Teilinjektionen,
- oberflächige Abdichtung des Ringraums zwischen Boden und Lanze (vgl. auch Bild 4).

Häufig beobachtete Probleme, die zu einem unbefriedigenden Ergebnis geführt haben, können wie folgt beschrieben werden:

- Leckagen bei der Anwendung von seitlich perforierten Lanzen (unkontrollierter Austritt),
- vorzeitiger Abbruch des Injektionsvorgangs wegen Austritts von Injektionsmittel entlang der Lanze,
- vertikal inhomogene Verteilung des Injektionsmittels mit Ausbauchungen im unteren Bereich (sog. „Elefantenfuß“) und geringen Mengen des Injektionsmittels im oberen Bereich (vgl. Bild 2),
- Fehlstellen in beabsichtigter Dichtwand, kein Verbund/Überschneiden einzelner Injektionskörper,
- Fehlstellen beim Sand mit höherem Feinanteil.

Großversuch	Trockendichte in g/cm <sup>3</sup>	Wassergehalt in %	Verdichtungsgrad in % der Proctordichte
GR1	1,70-1,76	7,8-10,5	91-94
GR2	1,72-1,76	7,2-9,1	92-94
GR3	1,69-1,75	7,3-13,6	89-93
GR4	1,65-1,73	8,9-8,5	88-92

Tabelle 1: Verdichtungskennwerte einzelner Großversuche  
Table 1: Compaction properties of the large-scale tests

Erfolg versprechende Injektionsergebnisse (z. B. Bild 3) können bereits durch folgende Maßnahmen erzielt werden:

- Anstelle perforierter Lanzen bzw. Lanzen mit seitlichen Öffnungen werden Lanzen mit verlöreener Spitze und unterer Öffnung genutzt.
- Die untersten zwei Ebenen werden mit einer zwei-stufigen Injektion vorverfestigt: Es wird zweimal an gleicher Stelle injiziert, wobei zwischen zwei Injektionen eine Wartezeit von minimal 20 Minuten eingehalten wird. Damit werden eine Abdichtung nach unten erzielt und somit eine ausgeprägte Ausbauchung und Kumulation des Injektionsmittels in den unteren Injektionshorizonten vermieden.
- Zusätzliche oberflächige Abdichtung des Ringraumes zwischen Injektionslanze und Boden zur Vermeidung eines vorzeitigen Materialaustritts (Manschettenwirkung, vgl. auch Bild 4).
- Einreihiges Injektionsraster mit einem horizontalen Lanzenabstand von ca. 40 cm sowie einem vertikalen Injektionsabstand der Tiefenhorizonte von 20 cm.
- Injektion von ca. 50 l Acrylatgel je lfd. Tiefenmeter unter den im Großversuch bestehenden Randbedingungen (verdichteter schluffiger Sand SU).

### 3 Mechanische Eigenschaften Mechanical properties

Die Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften der aus Injektionskörpern gewonnenen Proben dienen der qualitativen und quantitativen Charakterisierung der maßgebenden Parameter sowie deren Streubreite. Die Bestimmung der Durchlässigkeit, der einaxialen Druckfestigkeit und der Scherfestigkeit (v. a. in der Kontaktzone zwischen Massivbauwerk und injiziertem Boden) steht im Fokus der Untersuchungen. Diese Eigenschaften der Proben werden in Abhängigkeit der Tiefenlage, der horizontalen Lage sowie der jeweiligen Injektionsvariante (optimierter Parameter) bestimmt.

#### 3.1 Einaxiale Druckfestigkeit Uniaxial compressive strength

Die einaxiale Druckfestigkeit dient der Bewertung des Verfestigungsgrades, der durch die Kunststoffinjektion erzielt worden ist.

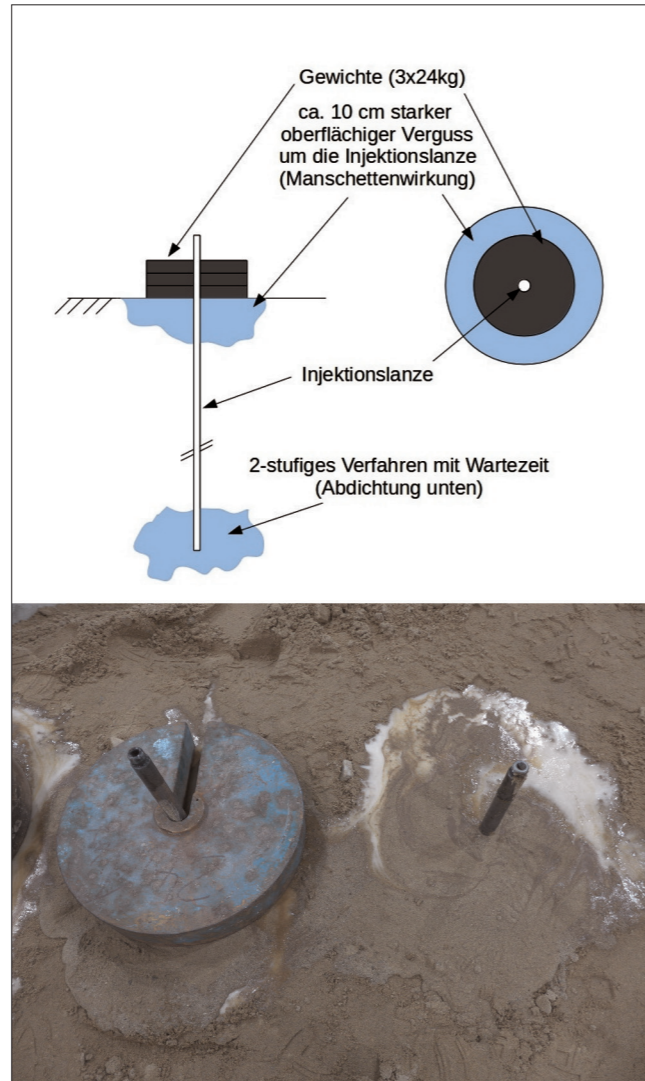


Bild 4: Zusätzliche Auflast und Abdichtung als Optimierungsmaßnahmen  
Figure 4: Additional load and sealing as optimisation measures

Im Bild 5 ist die Abhängigkeit zwischen der maximalen einaxialen Druckfestigkeit und dem natürlichen Wassergehalt der Proben aufgezeigt. Es ist zu erwähnen, dass der Wassergehalt standardmäßig bei einer Trocknung über 24 Stunden bei einer Temperatur von 105 °C ermittelt wird. Allerdings bindet das eingesetzte Kunststoffacrylat Wasser sowohl chemisch als auch physikalisch, sodass bei dieser Methode nicht der tatsächliche Wassergehalt wie bei reinen Sanden bestimmt werden kann. Es ergibt sich eine lineare Abhängigkeit zwischen dem vorhandenen Wassergehalt und der maximalen einaxialen Druckspannung. Diese Abhängigkeit konnte in allen durchgeführten Großversuchen bestimmt werden.

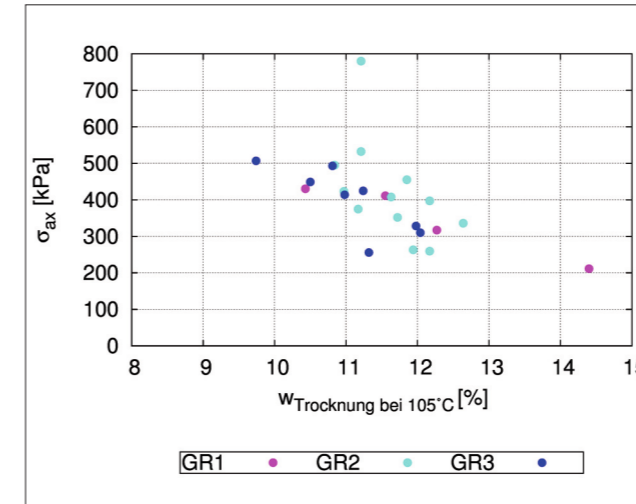


Bild 5: Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Wassergehalt  
Figure 5: Dependence of compressive strength on water content

Die zu untersuchenden Proben werden in verschiedenen Abständen von der Injektionslanze sowie Tiefenhorizonten und entnommen. Die Bilder 6 bzw. 7 zeigen die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom horizontalen Lanzenabstand bzw. von der Tiefenlage, jeweils ausgewertet für die Großversuche GR2 und GR3. Wie aus den Bildern ersichtlich, ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einaxialer Druckspannung und dem horizontalen Probenabstand zur Lanze bzw. der Tiefenlage.

Eine Versuchsserie ist an Proben durchgeführt worden, die im Vorfeld 24 Stunden im Wasserbad lagerten. Die

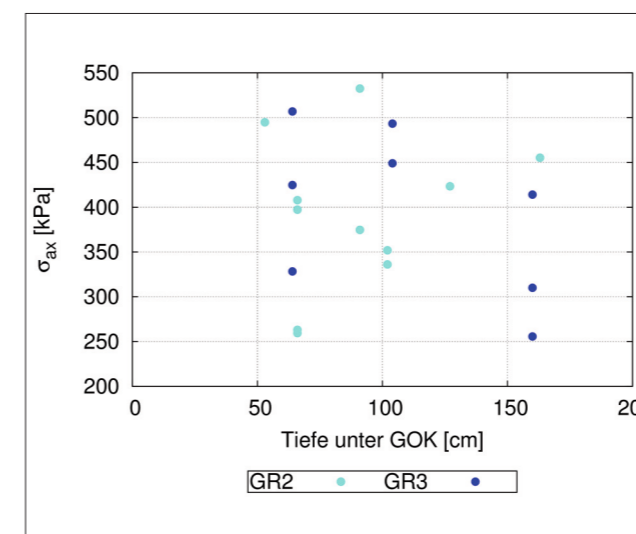


Bild 7: Druckfestigkeit – Einfluss der Tiefenlage  
Figure 7: Compressive strength – Influence of the injection depth position

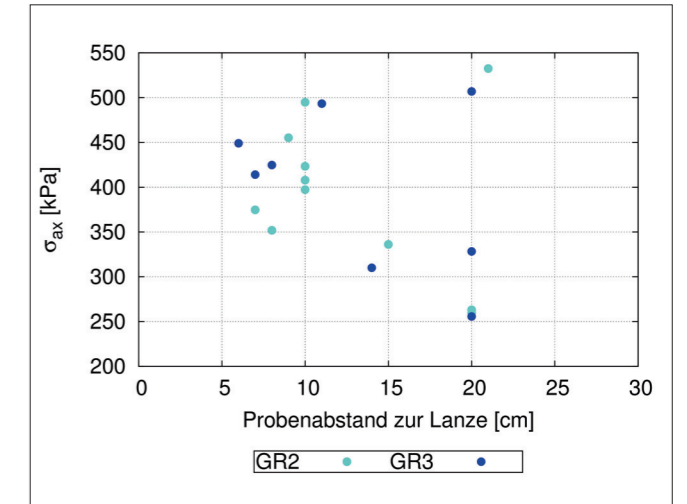


Bild 6: Druckfestigkeit – Einfluss des Probenabstandes zur Injektionslanze  
Figure 6: Compressive strength – Influence of distance of sample from the grouting lance

se Proben wurden parallel zu Proben entnommen, die bei natürlichem Wassergehalt getestet worden sind. Das Kunststoffacrylat im Porenraum der injizierten Proben ist in der Lage, Wasser auf- und wieder abzugeben. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Bild 8 aufgeführt. In Tabelle 2 sind die jeweiligen Kennwerte zusammengefasst. Signifikant ist, dass der E-Modul bei Proben mit erhöhtem Wassergehalt deutlich geringer ist als bei Proben mit natürlichem Wassergehalt. Die maximal aufnehmbare Druckspannung ist bei den in Wasser gelagerten Proben geringer und das Spannungsmaximum wird bei einer größeren Stauchung erreicht. Diese Proben sind somit elastischer, da die maximale Dehnung später

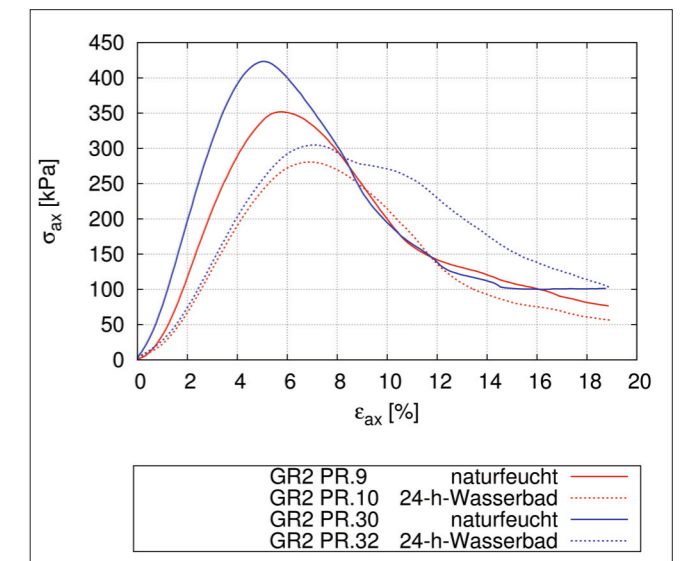


Bild 8: Druckfestigkeit – Einfluss der Wasseraufnahme  
Figure 8: Compressive strength – Influence of water uptake

Probe	Zustand	Wassergehalt	E-Modul (MPa)	$\sigma_{max}$ (kPa)
GR2_30	natürlich	11	12,1	424
GR2_32	24-h-Bad	12,5	6,7	328
GR2_09	natürlich	11,5	9,6	411
GR2_10	24-h-Bad	13,8	6,1	307

Tabelle 2: Eigenschaften der Proben bei natürlichem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung  
 Table 2: Properties of the samples under natural conditions and after 24 h of water storage

erreicht wird. Eine Wasseraufnahme führt somit zu einer Steigerung, eine Wasserabgabe (Austrocknung) hingegen zu einer Reduzierung der Elastizität (Versprödung).

Weiterhin kann beobachtet werden, dass die seitlich ungestützten Proben nach dem Versagen nicht vollständig zerfallen und bei großen Axialstauchungen ( $\epsilon_{ax} > 15\%$ ) eine einaxiale Restfestigkeit aufweisen. Dieser Effekt ist wiederum auf die elastischen Eigenschaften des Kunststoffacrylats zurückzuführen. Das gummiartige Acrylat wirkt dabei als hochelastisches Bindemittel zwischen den einzelnen Körnern, was letztlich zu einem für Sand untypischen Versagensmuster führt.

### 3.2 Durchlässigkeit Permeability

Die Durchlässigkeitsversuche dienen der Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit der Injektionskörper im Vergleich zum Einbaustand des verdichteten Sandes. Dabei werden die Durchlässigkeiten ( $k_{10}$ ) verschiedener Proben aus unterschiedlichen Injektionskörpern und Tiefenhorizonten sowie aus Überschneidungsbereichen zweier Injektionskörper untersucht und mit den Durchlässigkeiten des reinen Sandes sowie des reinen Acrylatgels verglichen. Die Proben werden hierfür bei unterschiedlichen Konsolidierungsspannungen (20, 40 und 80 kPa) und mit zwei verschiedenen Gradienten untersucht.

Die Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der aufgetragenen Konsolidierungsspannung ist in Bild 9 dargestellt. Die Ergebnisse der aus den Injektionskörpern entnommenen Proben sind als Mittelwerte meh-

rerer Versuche abgebildet. Die Proben aus den Überschneidungsbereichen sind dabei jedoch nicht in die Mittelwertbildung mit einbezogen worden. Der zu 92 % Proctordichte verdichtete Sand ist in dem untersuchten Spannungsbereich nicht ausgeprägt spannungsabhängig. Der zugehörige Durchlässigkeitsbeiwert bewegt sich zwischen  $9 \cdot 10^{-4}$  und  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s.

Im Gegensatz dazu weisen die injizierten Proben eine starke Spannungsabhängigkeit auf. Dies ist auf das ausgeprägt nicht-linear elastische Verformungsverhalten des Acrylatgels zurückzuführen. Das Vorhandensein des Kunststoffes im Porenraum führt zu einer höheren Elastizität der Proben. Sie lassen sich somit bei erhöhten Spannungen stärker zusammendrücken, was wiederum eine Verringerung der Durchlässigkeit zur Folge hat. Die Durchlässigkeiten der injizierten Bodenproben liegen im Durchschnitt 1,5 Zehnerpotenzen (Konsolidierungsspannung 40 kPa) bzw. 2,5 Zehnerpotenzen (Konsolidierungsspannung 80 kPa) niedriger als bei reinem Sand.

Die Durchlässigkeit des reinen Acrylatgels kann mit drei (Konsolidierungsspannung 40 kPa) bzw. vier Zehnerpotenzen (Konsolidierungsspannung 80 kPa) geringer als die des reinen, verdichteten Sandes angegeben werden. Sie weist aber gegenüber den untersuchten Injektionsproben ein noch ausgeprägteres spannungsabhängiges Verhalten auf (nicht-linear elastisch), wobei die

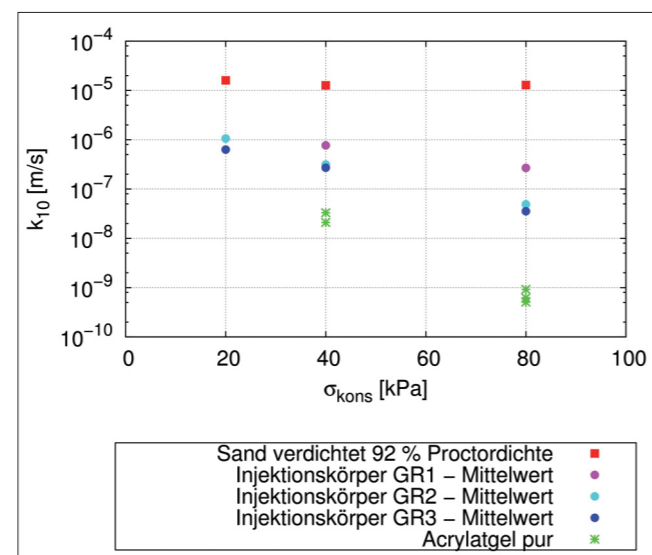


Bild 9: Durchlässigkeit – Einfluss der aufgetragenen Konsolidierungsspannung, Mittelwerte aus mehreren Großversuchen  
 Figure 9: Permeability – Influence of consolidation stress, average value of several large-scale tests

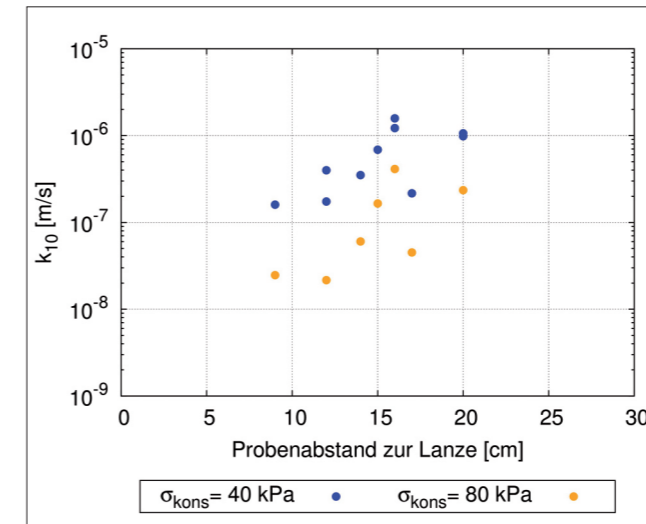


Bild 10: Durchlässigkeit – Einfluss des Abstands der Probe zur Lanze, exemplarisch für Großversuch GR3  
 Figure 10: Permeability – Influence of distance of the sample from the grouting lance (e.g. large-scale test GR3)

Durchlässigkeit mit steigender Auflast stark abnimmt. Das ist dadurch begründet, dass das wasserquellfähige Acrylat in der Lage ist, Wasser aufzunehmen und in das Molekülkettennetz einzulagern sowie sein Volumen um bis zu 20 % vergrößern. Dabei verliert es an Steifigkeit und wird gummielastisch. Bei einer aufgetragenen Spannung hingegen wird Wasser aus der Kettenstruktur herausgedrückt, wobei sich das Volumen verringert, die Dichte sich vergrößert und folglich die Durchlässigkeit sinkt.

Ähnlich den Untersuchungen zur einaxialen Druckfestigkeit werden Proben aus verschiedenen Tiefenhorizonten und in unterschiedlichen Abständen von der Injektionslanze gewonnen und analysiert. In Bild 10 ist deutlich eine Abhängigkeit der Durchlässigkeit mit der Entfernung der Probenentnahme von der Injektionslanze zu erkennen. Die Aussage, dass die Proben mit zunehmendem Abstand von der Injektionslanze immer durchlässiger werden, trifft für fast alle Proben und für beide untersuchten Bereiche der Konsolidierungsspannungen (40 kPa, 80 kPa) zu.

Weiterhin sind große Schwankungen der Durchlässigkeitswerte innerhalb eines Konsolidierungsspannungsbereiches zu erkennen. Proben mit Abständen größer als 15 cm von der Lanze befinden sich schon im Überlagerungsbereich / Überschneidungsbereich zweier Injektionskörper bei einem Injektionsrastermaß von 40 cm und weisen auch größere Durchlässigkeiten auf.

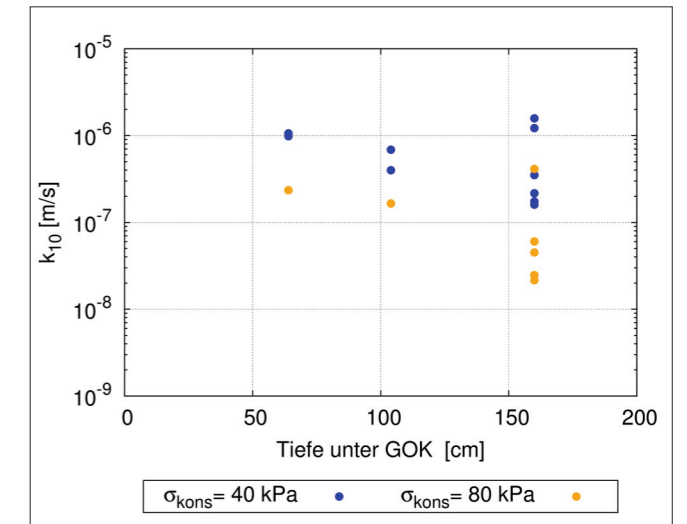


Bild 11: Durchlässigkeit – Einfluss der Injektionstiefe, exemplarisch für Großversuch GR3  
 Figure 11: Permeability – Influence of the injection depth (e.g. large-scale test GR3)

Weiterhin ist anzumerken, dass sich keine deutliche Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes von der Injektionshöhe feststellen lässt (Bild 11). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Werte in einer Tiefe von 1,6 m unter Dammkrone, in der eine mehrstufige Injektion durchgeführt wurde, stark streuen und die Größen sowohl ober- als auch unterhalb derer in oberen Tiefenhorizonten (einstufige Injektion) liegen. Um eine eindeutige Aussage über den Effekt von mehrstufigen Injektionen treffen zu können, muss dieser Zusammenhang in den nächsten Großversuchen genauer betrachtet werden.

### 3.3 Scherfestigkeit – Verhalten in Kontaktzonen Shear strength – Behaviour of contact zones

Als Schwachstelle hinsichtlich einer sicheren Abdichtung gelten bei Dämmen und Deichen die Anschluss- und Übergangsbereiche zu eingebundenen bzw. anschließenden Massivbauwerken, z. B. aus Beton. Wegen des unterschiedlichen Setzungs- und Verformungsverhaltens des Erd- und Massivbauwerks kommt es häufig zur Rissbildung in der Kontaktzone oder zum kompletten Abreißen des Erdstoffes, was in der Folge Sickerwege generiert und ein Versagen durch Erosion und Suffosion provoziert. Als Qualitätsmerkmale können daher eine verbesserte Haftung des Bodens am Betonbauwerk verbunden mit einer erhöhten Scherfestigkeit

in der Kontaktzone betrachtet werden. Zur Beurteilung der Scherfestigkeit im o. g. Übergangsbereich werden daher Rahmenscherversuche durchgeführt.

Die Anbindung zu einem Massivbauwerk wird durch den Einsatz von Betonwinkelstützelementen simuliert. Um jedoch größere Materialverluste der Winkелеlemente durch Probennahmen zu vermeiden sowie eine bessere Probenaufbereitung für den Rahmenscherversuch zu ermöglichen, werden 20 mm starke Textilbetonplatten verwendet, die in eine präparierte Nische eingesetzt werden und in reproduzierbarer Qualität austauschbar sind. Die Probenentnahme selbst wird mit Hilfe einer Diamantbohrkrone als Kernbohrung vorgenommen (Bild 12).

Die Scherfestigkeit wird auch an Sandproben bei einer Proctordichte von 92 % bestimmt und mit der von Proben aus Injektionsbereichen verglichen. Hierbei kommen niedrige Normalspannungen als Auflast zum Einsatz, da sie als typisch für Damm- bzw. Deichbauwerke angesehen werden können.

Die Versuchsserie zur Bestimmung der Scherfestigkeit in der Kontaktzone Beton – Injektionskörper musste im Vorfeld durch einen Versuch mit einer mittleren Normalspannung (165 kPa) ergänzt werden, da es bei der Durchführung mit minimaler Auflast (25 kPa) zu technischen Problemen (Verkantung der Probe) gekommen ist.

Die Ergebnisse der Rahmenscherversuche sind in Bild 13 für den Verlauf der gemessenen Scherspannung



Bild 12: Probenentnahme mittels Kernbohrung, Kontaktzone Beton – Injektionskörper

Figure 12: Sampling by core drilling, contact zone concrete – injected soil

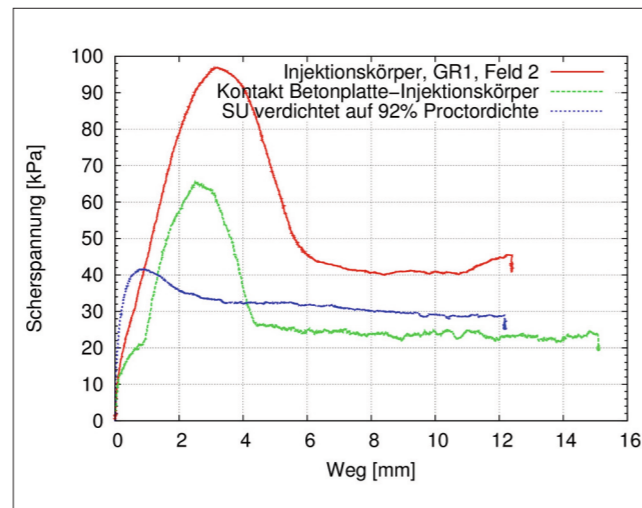


Bild 13: Scherspannungsverläufe – Vergleich für eine aufgebrauchte Normalspannung von 45 kPa

Figure 13: Shear stress – Comparison for a normal stress of 45 kPa

bei einer Normalspannung von 45 kPa dargestellt. Der verdichtete Sand (blau) weist hierbei die niedrigste Scherfestigkeit auf, wobei die maximale Scherspannung beim kürzesten Scherweg erreicht wurde. Das injizierte Acrylatgel verfestigt das Sandgefüge und führt zu den bereits o. g. elastischen Eigenschaften, die sich auch im Scherverhalten widerspiegeln. Die Proben der Injektionskörper (rot) erreichen das Maximum der Scherspannung beim dreifachen Scherweg im Vergleich zum reinen, verdichteten Sand. Die maximale gemessene Scherspannung und der zugehörige Scherweg im Bereich der Kontaktzone Beton – Injektionskörper sind jedoch geringer als diejenigen der Injektionskörper, da es sich um einen Kontakt bzw. Übergangsbereich zu einer relativ glatten Oberfläche (Betonplatte) handelt. Dennoch liegt die maximale Scherspannung beim 1,5-fachen des reinen Sandes.

Den Vergleich der Peakscherfestigkeiten aller Versuchsserien bei allen untersuchten Normalspannungen zeigen die Mohr-Coulombschen Grenzumschließenden in Bild 14. Der Peakreibungswinkel ist nur geringfügig durch die Injektion des Acrylatgels beeinflusst (geringe Erhöhung der Steigung der Gerade). Dies unterstreicht die These der primären Verfestigung sowie die Verklebung der Bodenkörner durch den Kunststoff (Bindemittelwirkung), was die erhöhte Kohäsion der verfestigten Proben widerspiegelt. Ein Zuwachs der Kohäsion um das Siebenfache gegenüber dem verdichteten Sand ist zu erkennen, was vor allem im Bereich geringer Auflast- bzw. Randspannungen von Bedeutung ist.

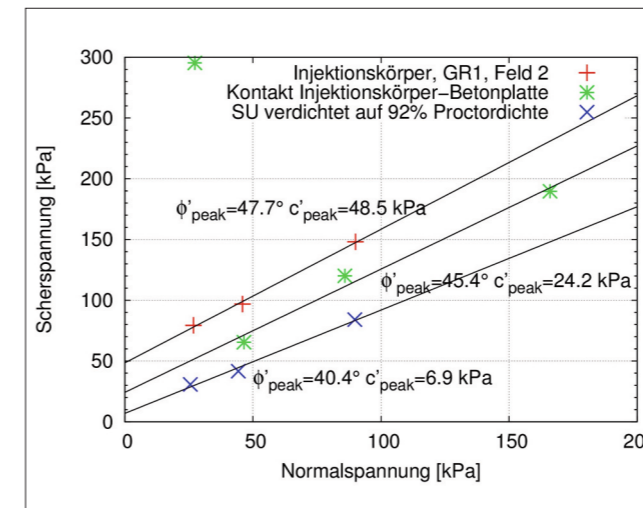


Bild 14: Scherfestigkeit – Vergleich der Mohr-Coulombschen Grenzumschließenden

Figure 14: Shear strength – Comparison of the Mohr-Coulomb strength envelopes

Die Scherfestigkeit in der Kontaktzone zwischen Betonbauwerk und Bodeninjektion fällt wiederum niedriger aus, was sich auch in der Kohäsion zeigt (ca. 50 % des Wertes bei Injektionskörpern). Dies ist wiederum, wie oben bereits erwähnt, auf die relativ glatte Ausbildung der Kontaktzone zurückzuführen. Allerdings kann eine bedeutende Verfestigung im Vergleich zum reinen, verdichteten Sand nachgewiesen werden.

## 4 Zusammenfassung Conclusions

Im Rahmen dieses anwendungsbezogenen Forschungsprojektes mit einem Industriepartner werden zur Abdichtung von Deichen und Dämmen ein Injektionsverfahren und dessen materialtechnische sowie technologische Komponenten entwickelt und mittels Großversuchen getestet.

Durch bestimmte Optimierungsmaßnahmen (Manschettenabdichtung der Injektionslanzen, zusätzliche Auflasten, Lanzen mit offener Spitze, mehrstufiges Injizieren usw.) sind bereits zufriedenstellende Ergebnisse zur Erzielung einer Injektionswand mit signifikant reduzierter Durchlässigkeit erreicht worden. Neben einer Qualitätsüberprüfung, Beschreibung sowie Vermessung (manuell bzw. mittels 3D-Oberflächenscanner) der erzielten Injektionskörper in-situ wird auch das mechanische Verhalten an definierten, aus den Injektionskörpern entnommenen Proben untersucht.

Es kann bereits eine deutliche Verfestigung des vorhandenen Versuchsbodens durch den Einsatz von Acrylatgel nachgewiesen werden. Die einaxiale Druckfestigkeit aller Proben der Injektionskörper liegt oberhalb eines Niveaus von 200 kPa. Die einaxiale Druckfestigkeit nimmt jedoch mit steigendem Wassergehalt näherungsweise linear ab. Gleichzeitig kommt es aber zu einer Erhöhung des Wassergehaltes aufgrund der Einlagerung in die Molekülkettenstruktur sowie zu einer Erhöhung der elastischen Verformbarkeit des injizierten Bodens. Darüber hinaus kann jedoch keine ausgeprägte Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Abstand zur Lanze bzw. vom Tiefenhorizont der Injektion festgestellt werden.

Die Durchlässigkeit der untersuchten Proben ist ausgeprägt spannungsabhängig und steigt mit wachsendem Abstand zur Lanze. Sie ist nach jetzigen Erkenntnissen im Kontakt- bzw. Überschneidungsbereich zweier Injektionskörper am größten. Gegenüber der hydraulischen Leitfähigkeit des nicht injizierten Bodens (Sand) liegt die Durchlässigkeit des injizierten Bodenmaterials ca. 1,5 Zehnerpotenzen (Konsolidierungsspannung 40 kPa) bzw. 2,5 Zehnerpotenzen (Konsolidierungsspannung 80 kPa) darunter. Pures Acrylatgel erreicht im Vergleich die geringsten Durchlässigkeitswerte.

Die Rahmenscherversuche zeigen eine Verbesserung der Haft- und Scherfestigkeit im Übergangsbereich zu Massivbauwerken. Die Erhöhung der drainierten Scherfestigkeit im untersuchten Spannungsbereich ist vor allem durch einen Zuwachs der echten Kohäsion gekennzeichnet. Der Reibungswinkel wird hingegen nur gering beeinflusst. Die größten Scherfestigkeiten werden an Proben aus Injektionskörpern gemessen. Die Scherfestigkeiten am Übergang zum Beton-/Massivbauwerk liegen darunter, was v. a. auf eine relativ glatte Kontaktfläche (schalglatte Betonoberfläche) zurückzuführen ist.

## 5 Literatur References

Kutzner, C. (1991): „Injektionen in Baugrund“, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Saucke, U. (2006): „Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe“, Geotechnik 29, Nr. 1, S. 43–54.

Striegler, W. (1998): „Dammbau in Theorie und Praxis“, Verlag für Bauwesen, Berlin.

TPH Bausysteme GmbH (2013): Technisches Datenblatt „RUBBERTITE“, Norderstedt.

Witt, K. J. (2009): „Grundbau – Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren“, Ernst Verlag, Berlin.