

Injektionen in tertiären Böden

Götz Tintelnot

Dipl.-Ing. Dieter Schmitt

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren wurden umfangreiche Erfahrungen bei der Abdichtung gering durchlässiger anhydritführender Tonsteine mit Acrylatgelen gemacht. Mit den Injektionen Anhydrit konnte das Gebirge in der Umgebung der Tunnel des Projekts Stuttgart 21 auf Durchlässigkeitsbeiwerte von 10^{-7} bis 10^{-9} m/s abgedichtet werden. Acrylatgele sind Newton'sche Flüssigkeiten, deren Viskositäten das 3- bis 4fache des Wassers betragen und die deshalb mit vergleichsweise geringen Drücken in feinste Spalten eingepresst werden können. Nach Überschreiten der Topfzeit, die sich in gewissen Grenzen einstellen lässt, erhärten die Gele und verfestigen bzw. dichten den verpressten Baugrund ab. Im Beitrag werden Ergebnisse von Modellversuchen an Sandkörpern vorgestellt, und es wird gezeigt, dass sich Fein- und Mittelsande erfolgreich verpressen lassen. Weiterhin wird über einen laufenden Feldversuch in einem im tertiären Sand liegenden Schacht auf der Baustelle der 2. S-Bahn Stammstrecke in München berichtet. Erste Ergebnisse lassen einen erfolgreichen Verlauf erwarten.

1. Einleitung

Beim Tunnelbau im Lockergestein unterhalb des Grundwassers werden häufig vorauseilende Sondermaßnahmen erforderlich, um die Hohlräume sicher und verformungsarm aufzufahren zu können. In diesem Zusammenhang haben in den letzten Jahren Injektionen zur Abdichtung und Stabilisierung des Baugrundes an Bedeutung gewonnen.

Im Beitrag wird über Erfahrungen mit dem Verpressen von Acrylatgel in Fels und Sanden berichtet.

2. Acrylatgel

Acrylatgele sind sehr niedrigviskose Injektionsstoffe aus Verbindungen der Acryl- und Methacrylsäure sowie Aminen und Salzen, die zu einem gummiartigen, flexiblen Endprodukt aushärten. Infolge der geringen Viskosität der frischen Mischung weist der Baustoff ein sehr gutes Eindringverhalten in den Baugrund bei geringen Drücken auf (Bild 1).

Acrylatgele werden durch Mischung einer aktivierten A-Komponente (Stammkomponente und Katalysator) mit einer aktivierten B-Komponente (Wasser und Initiator) hergestellt. Das Fließverhalten der frischen Mischung entspricht näherungsweise dem einer Newton'schen Flüssigkeit und ist maßgeblich abhängig von der dynamischen Viskosität η . Eine Fließgrenze ist nicht vorhanden (Bild 2, links).

Sehr niedrigviskose Injektionsstoffe aus Verbindungen der Acryl- und Methacrylsäure, sowie Aminen und Salzen

Aushärtung zu gummiartigen flexiblem Produkt



Acrylatgel Rubbertite nach Reinigen Injektionsleitung

Sehr gutes Eindringverhalten in den Baugrund bei geringen Drücken

Bild 1: Acrylatgel

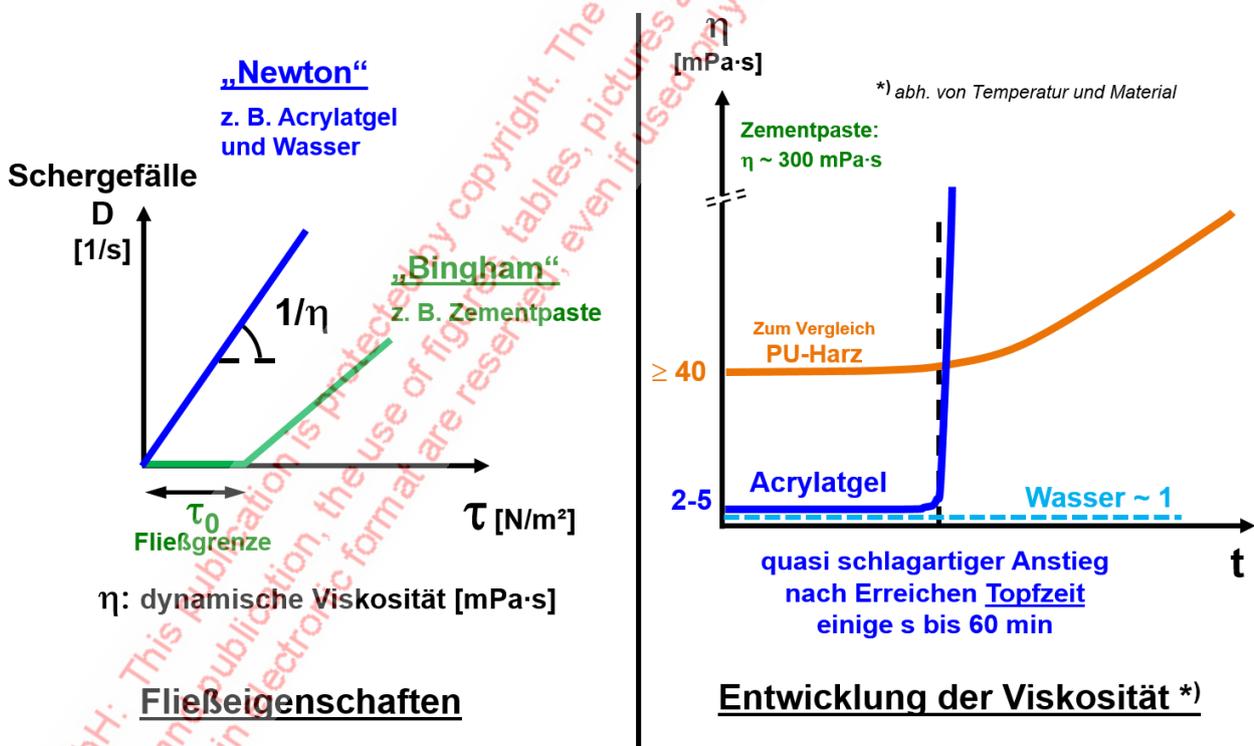


Bild 2: Acrylatgel - Eigenschaften

Die Viskosität des frischen Acrylatgels beträgt 2 - 5 mPa · s und ist damit der des Wassers ähnlich. Sie bleibt bis zum Erreichen der Topfzeit nahezu konstant. Dann tritt ein quasi schlagartiger Anstieg der Viskosität auf und das Injektionsgut verfestigt.

Die Topfzeit kann im Bereich von wenigen Sekunden bis über eine Stunde eingestellt werden. Damit können auch längere Verpresszeiten und größere Reichweiten erzielt werden (Bild 2, rechts). Zum Vergleich ist im Bild 2, rechts qualitativ die Entwicklung der Viskosität eines PU-Harzes eingetragen. Diese beträgt bei niedrig viskosen Harzen im frischen Zustand ca. $40 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ und steigt während der Reaktion stetig an.

3. Erfahrungen Injektionen Anhydrit

Bei den Tunneln des Projektes Stuttgart 21 wurde in den vergangenen Jahren in großem Umfang Acrylatgel in den anhydritführenden Fels verpresst. Ziel der Injektionen Anhydrit war, die hohlraumnahe vortriebsbedingte Auflockerungszone abzudichten und möglichst eine Durchlässigkeit wiederherzustellen, die dem Ausgangszustand entspricht. Dazu war es erforderlich, auch Klüfte mit Öffnungsweiten von $2a_i = 0,005 \text{ mm}$ zu verpressen und abzudichten (Bild 3).

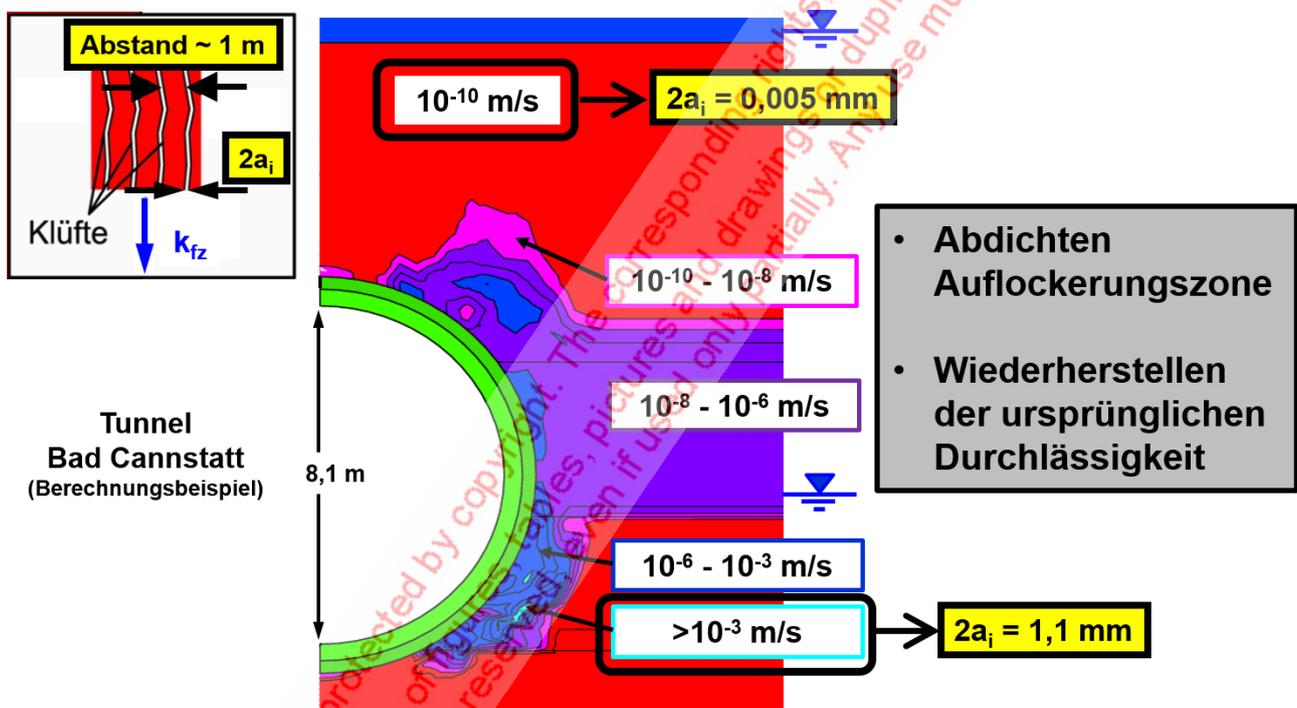


Bild 3: Vertikale Durchlässigkeit nach dem Auffahren des Tunnels und Ziel der Injektionen

Im Rahmen von Versuchen mit einem Spaltmodell wurde die Eindringfähigkeit von Acrylatgel und PU-Harz vergleichend untersucht. Der Abstand der Plexiglasplatten im Modell und damit die Öffnungsweite des Spalts betrug $0,07 \text{ mm}$. Das Verpressgut wurde in den Versuchen über eine Bohrung von oben in den Spalt injiziert. Die Druckhöhe betrug 50 cm . Gemessen wurde das Eindringen des Verpressmittels in den Spalt in seiner zeitlichen Entwicklung (Bild 4, rechts oben).

Die im Diagramm in Bild 4 in Blau dargestellte Messkurve für ein Acrylatgel mit einer Viskosität von $\eta = 2,5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ weist aus, dass das Acrylatgel nach 3 Minuten ca. 30 cm in den Spalt eingedrungen war. Im Vergleich dazu benötigte das eingesetzte PU-Harz, dessen Viskosität $45 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ beträgt, einen Zeitraum von ca. 54 Minuten, bis eine Eindringtiefe von

30 cm erreicht war. Das Verhältnis der Zeiträume, die für eine Reichweite von 30 cm erforderlich waren, beträgt somit $54/3 = 18$ und entspricht dem Verhältnis der Viskositäten (Bild 4).

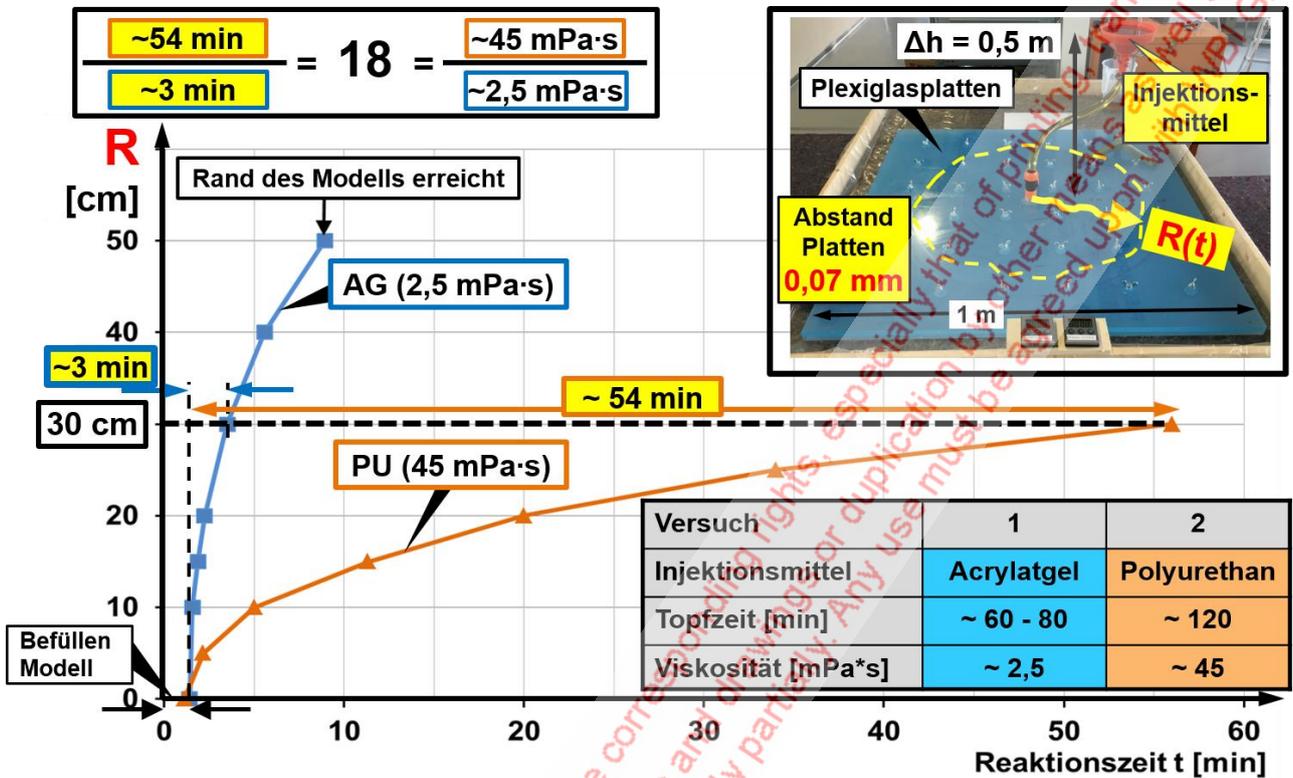


Bild 4: Versuche mit dem Spaltmodell

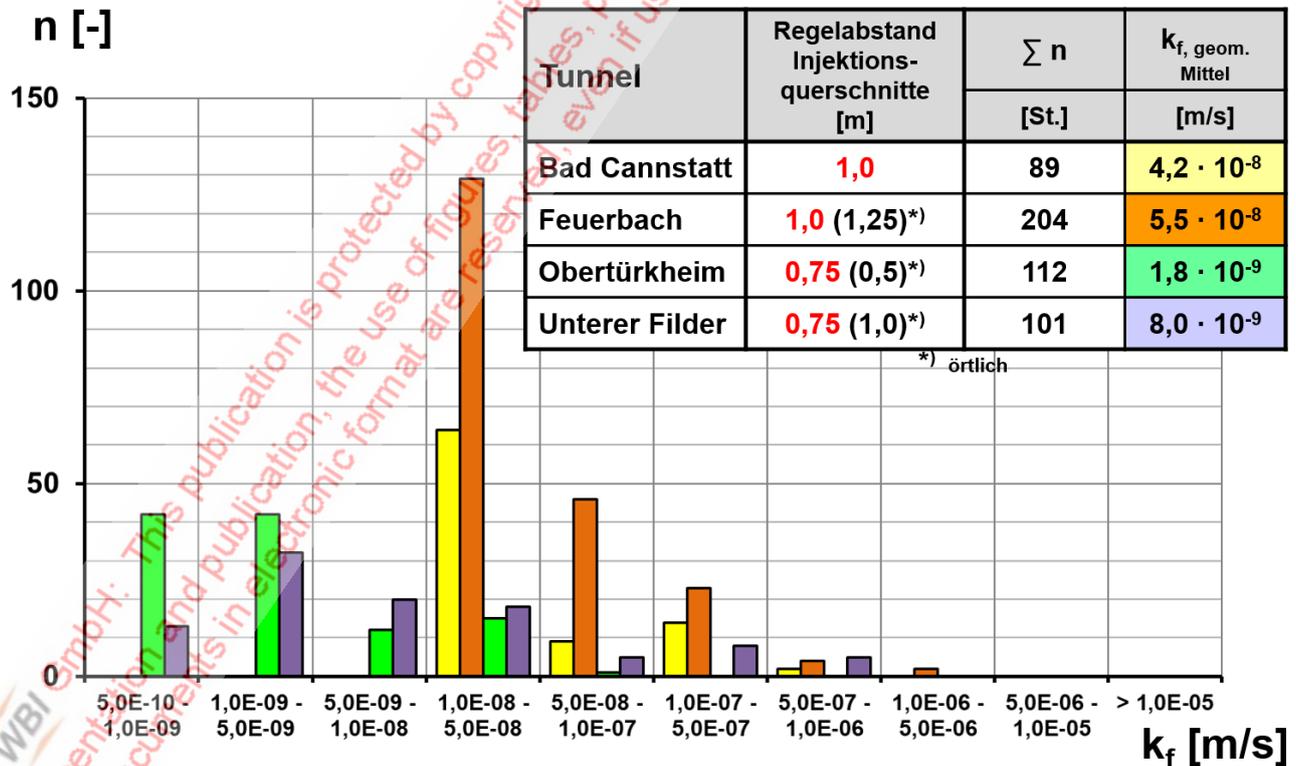


Bild 5: Ergebnisse "Injektionen Anhydrit" - Durchlässigkeitsversuche

Im Hinblick auf Injektions- und Bauzeiten wird daraus ein wesentlicher Vorteil der niedrigviskosen Acrylatgele gegenüber den PU-Harzen deutlich.

Die Injektionen Anhydrit wurden unter Verwendung der Acrylatgele im Fels erfolgreich ausgeführt. Dabei wurden in Abhängigkeit vom gewählten Abstand der Injektionsquerschnitte Durchlässigkeitsbeiwerte bis i. M. 10^{-9} m/s erreicht (Bild 5).

4. Modellversuche im Sand

Der Einsatz von Acrylatgel im Sand zur Verfestigung und Abdichtung wurde in den vergangenen Jahren von TPH mit Hilfe von Modellversuchen untersucht. An der TU Dresden wurden dazu in mehreren Großversuchen Modelldämme geschüttet und messtechnisch ausgerüstet (Bild 6).



| Großversuch | Trockendichte in g/cm ³ | 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 |

Bild 6: Projekt DIWAN, Aufbau Versuchskörper an der TU Dresden

Die Kornverteilungskurven des Modellsandes weisen Feinkornanteile zwischen 7 und 12 % aus. Der Sand wurde lagenweise eingebaut und verdichtet (Bild 7).

An der Krone der Dämme wurden Reihen von Injektionslanzen angeordnet, über die das Acrylatgel in verschiedenen Tiefen verpresst wurde. Dabei wurden Injektionen sowohl in erdfeuchten als auch in eingestauten Dämmen ausgeführt (Bild 8).

Nach Abschluss der Injektionen wurden die Injektionskörper freigelegt und untersucht. Bei entsprechender Wahl der Lanzenanordnung und der Injektionsparameter konnten geschlossene Injektionskörper erzeugt werden (Bild 9).

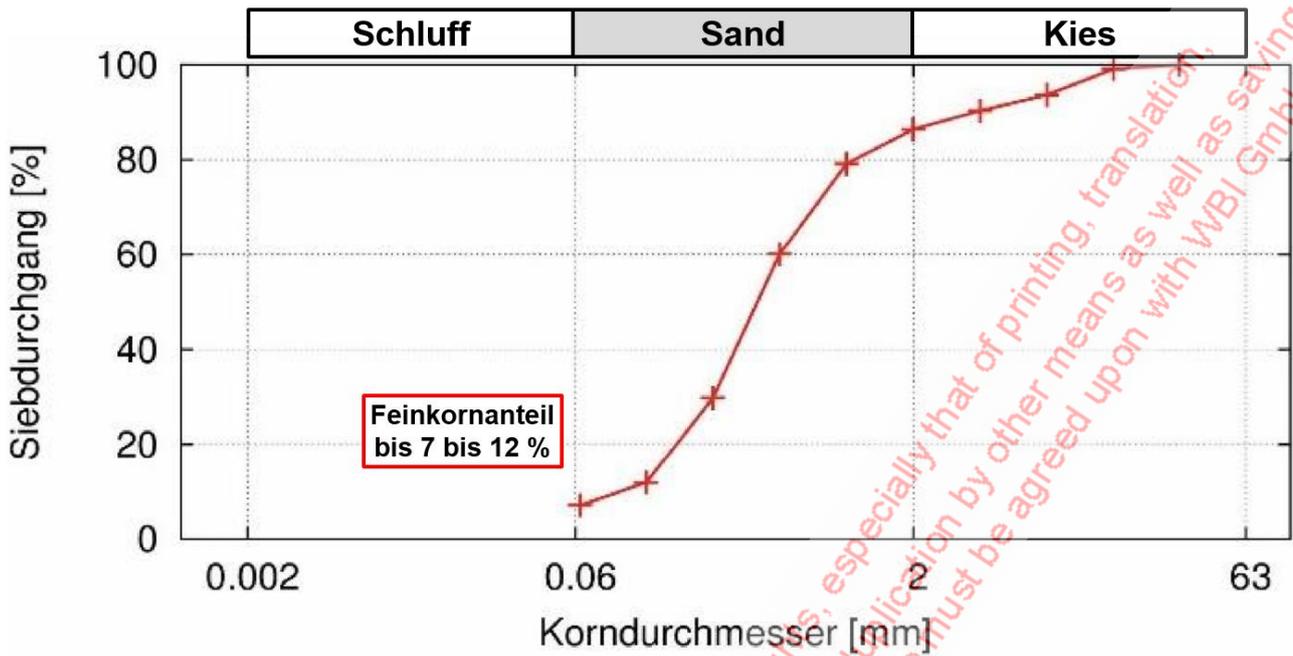
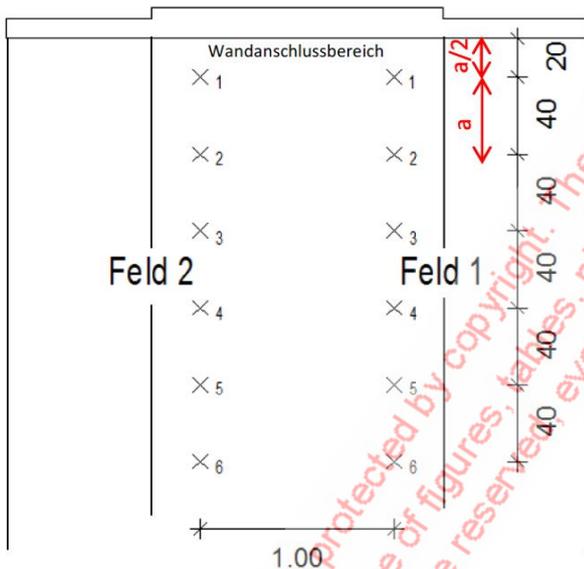


Bild 7: Kornverteilung Versuchssand



Dämme
erdfeucht und auch eingestaut

Raster auf der „Dammkrone“

Verpressen über Rammlanzen

Bild 8: Großversuche TU Dresden, Injektion von Acrylatgel

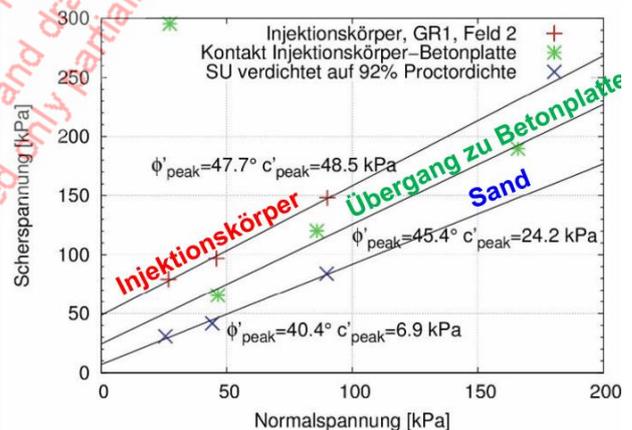
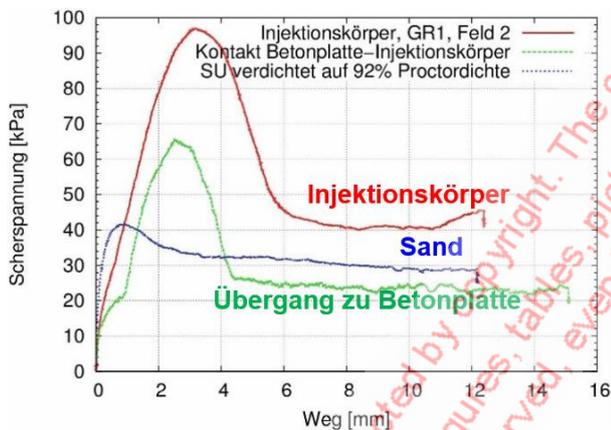
Nach dem Freilegen wurden Proben aus den Verpresskörpern entnommen und im Labor untersucht. Dabei konnte eine deutliche Erhöhung der Scherfestigkeit gegenüber den Sanden festgestellt werden. Ausgeprägt war die Ausbildung einer Kohäsion bei vergleichsweise nur geringer Erhöhung des Reibungswinkels. Die Scherfestigkeit im Übergang zu Massivbauteilen war geringer als die der Injektionskörper selbst (Bild 10).

horizontaler Lanzenabstand
a = 40 cm

vertikaler Abstand der Injektionshorizonte
b = 20 cm



Bild 9: Freigelegte geschlossene Injektionskörper

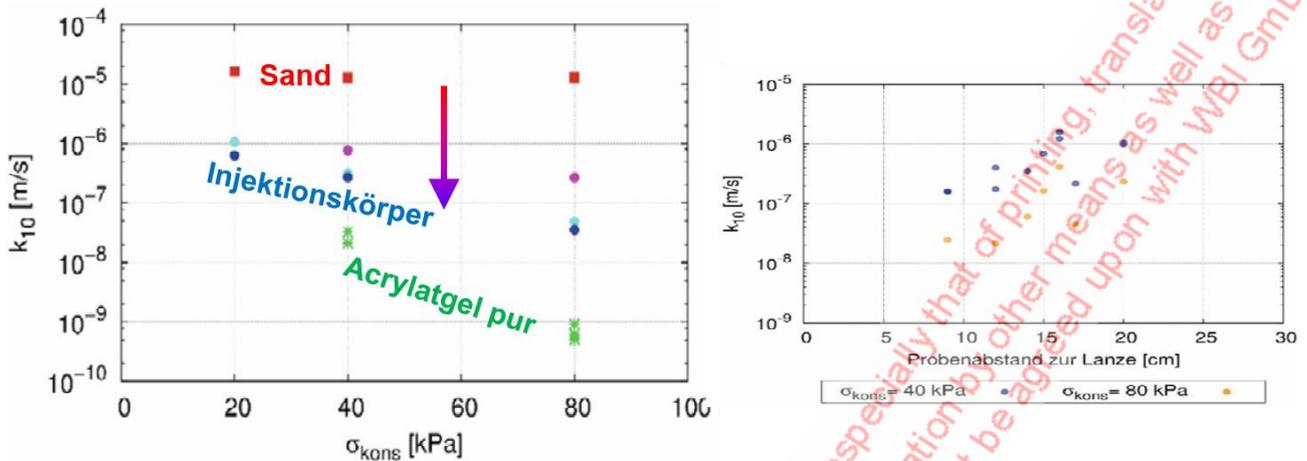


- **deutliche Erhöhung der Kohäsion**
- **gewisse Erhöhung des Reibungswinkels**
- **Generierung „elastischen“ Verhaltens**
- **Scherfestigkeit im Übergang zu Massivbauteilen geringer**

Bild 10: Ausgewählte Ergebnisse der Großversuche - Scherfestigkeit

Die Durchlässigkeit der Probekörper war gegenüber der des Sandes um 1,5 bis 2,5 Größenordnungen geringer. Dabei war eine Abhängigkeit von der aufgetragenen Konsolidationsspannung festzustellen. Proben, die in größerem Abstand zu einer Injektionslanze entnommen wurden, wiesen in der Tendenz eine höhere Durchlässigkeit auf, als Proben, die in unmittelbarer Nähe zu einem Austrittsort entnommen wurden (Bild 11).

Auch an der Universität der Bundeswehr wurden im Auftrag von TPH umfangreiche Modelluntersuchungen zum Einpressen von Acrylatgel in Sande durchgeführt.



- **deutliche Verringerung der Durchlässigkeit**
minus 1,5 – 2,5 Zehnerpotenzen
spannungsabhängig
- **Einfluss Lanzenabstand**

Bild 11: Ausgewählte Ergebnisse der Großversuche - Durchlässigkeit

5. Feldversuch in München

Zur Untersuchung der Einpresstechnologie von Acrylatgel in tertiäre Sande wird zur Zeit ein Feldversuch im Bereich des Rettungsschachtes RS 3 der 2. S-Bahn-Stammstrecke München ausgeführt. Dabei werden 20 m Tiefe, i. W. vertikale Injektionsbohrungen hergestellt, die innerhalb der Bohrpfahlwand der Schachtsicherung angeordnet sind (Bild 12).

Die Schichtlagerung im Schacht wurde mit Hilfe von 2 Erkundungsbohrungen ermittelt. An den im Bild 13, rechts dargestellten Proben wurde die Kornverteilung der Sande bestimmt. Danach weisen die untersuchten Proben Feinkornanteile von ca. 20 % aus. Die Kornverteilungen liegen innerhalb des von früheren Untersuchungen bekannten Körnungsbandes der tertiären Sande (Bild 14).

Der Feldversuch umfasst 8 Injektionsbohrungen. Neben zwei Einzelbohrungen I-1 und I-2 sind zwei Tripel 1 und 2 geplant. Der gegenseitige Abstand der Bohrachsen der Tripel beträgt 71 bzw. 90 cm (Bild 15).

Untersuchungsziele des Versuchs sind

- die erzielbaren Reichweiten und Abmessungen der Injektionskörper.
- Die Festigkeit, die Verformbarkeit und die Durchlässigkeit des Boden-Injektions-Gemischs.
- Der Verbund der Injektionskörper untereinander und zu den Bohrpfählen (Bild 15).

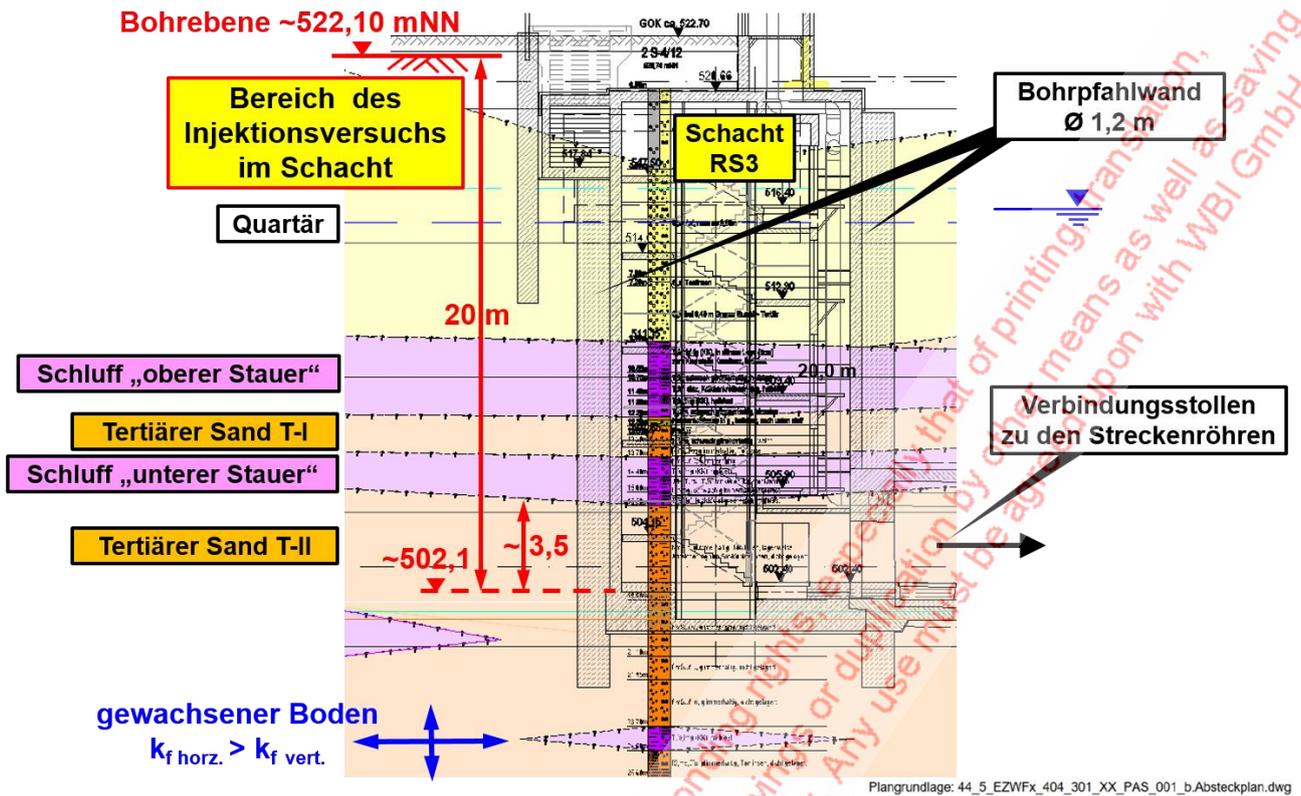


Bild 12: Vertikalschnitt mit Untergrundaufbau Rettungsschacht 3

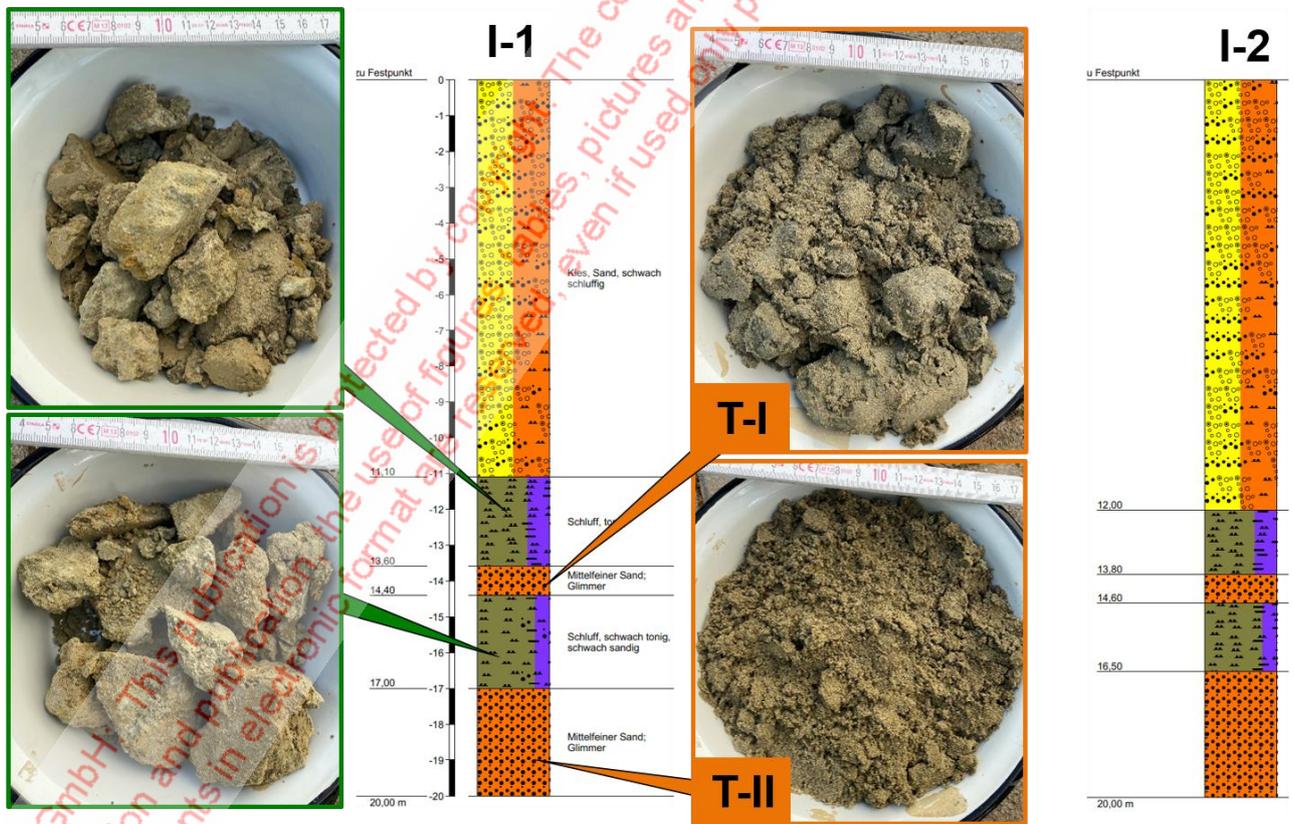


Bild 13: Bohrprofile I1 und I2 und Bodenproben

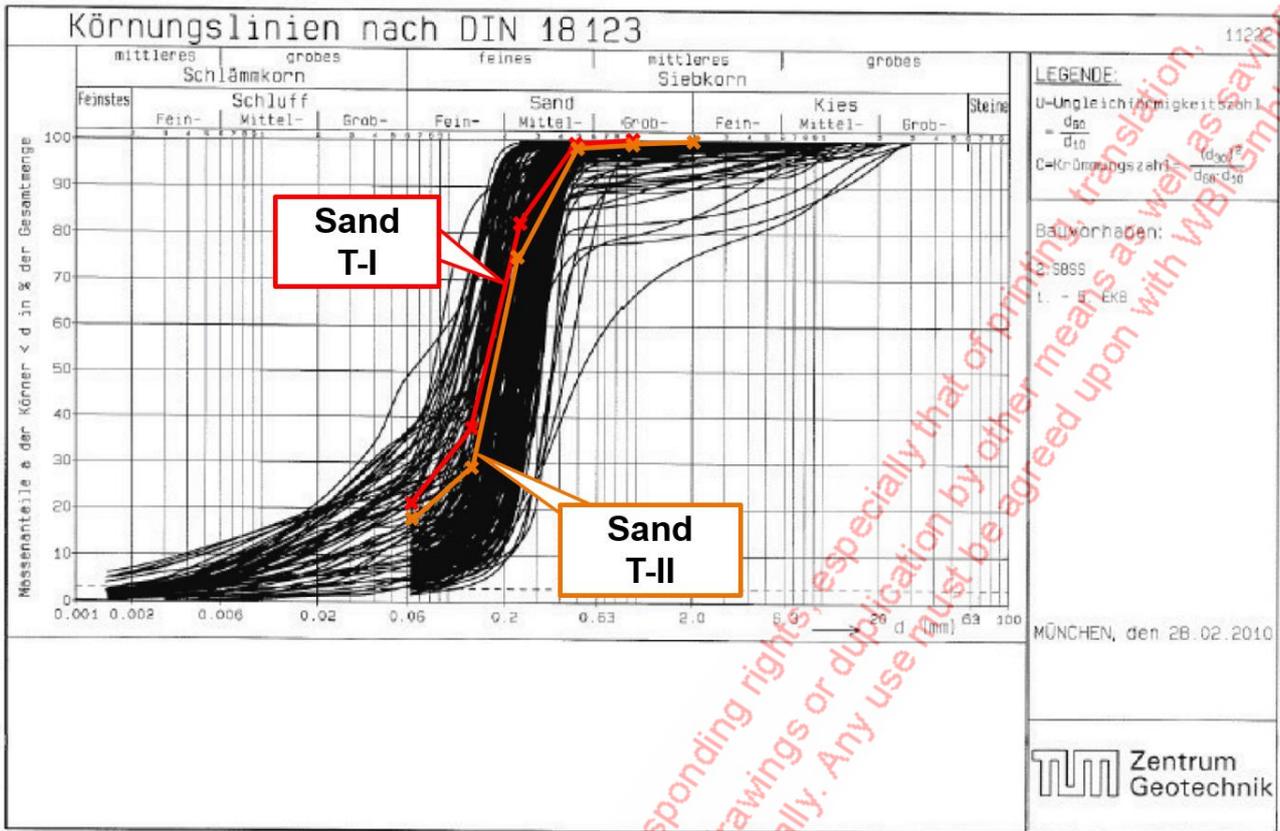
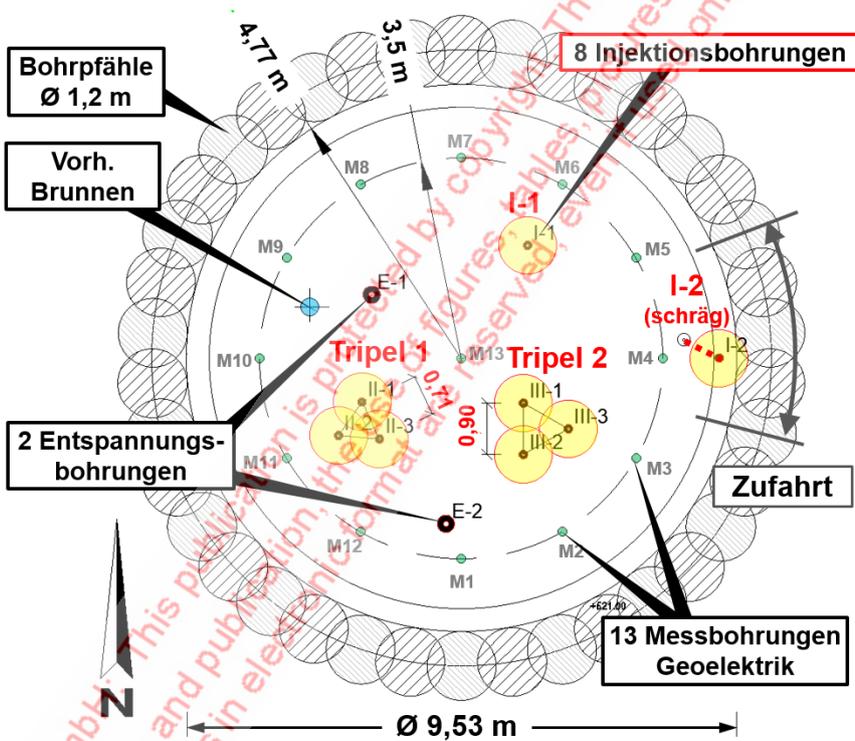


Bild 14: Kornverteilungen - Tertiäre Sande RS 3



- Injektionskörper im T-I und T-II
- Reichweite und Abmessungen
- Festigkeit und Verformbarkeit
- Durchlässigkeit
- Verbund der Injektionskörper
- Verbund zu Massivbauteilen

Bild 15: Lageplan mit Bohrungen und Untersuchungszielen

Die Injektionen werden mit Hilfe von Manschettenrohren ausgeführt. Da die Sande des T-I und T-II im Versuchsfeld von der überschrittenen Bohrfahlwand dicht umschlossen sind,

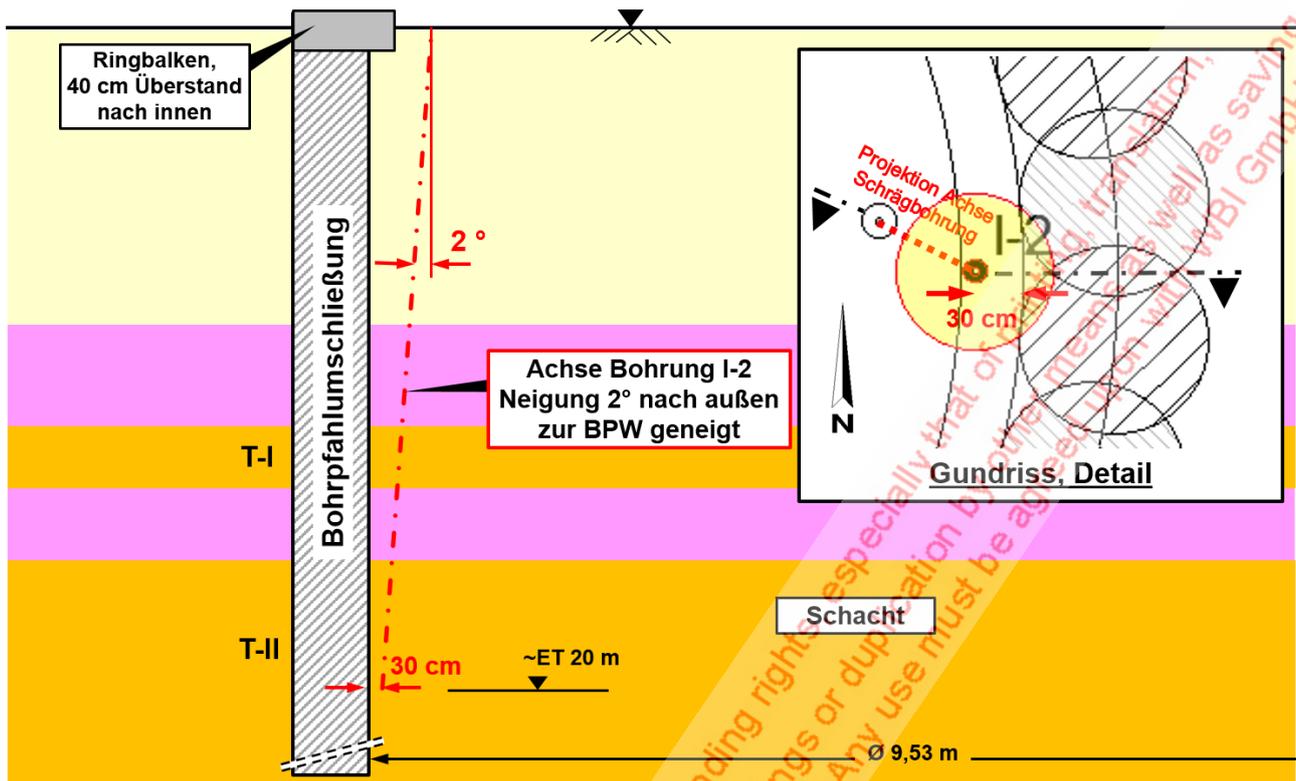


Bild 17: Neigung Injektionsbohrung I-2 (Prinzipische Skizze)

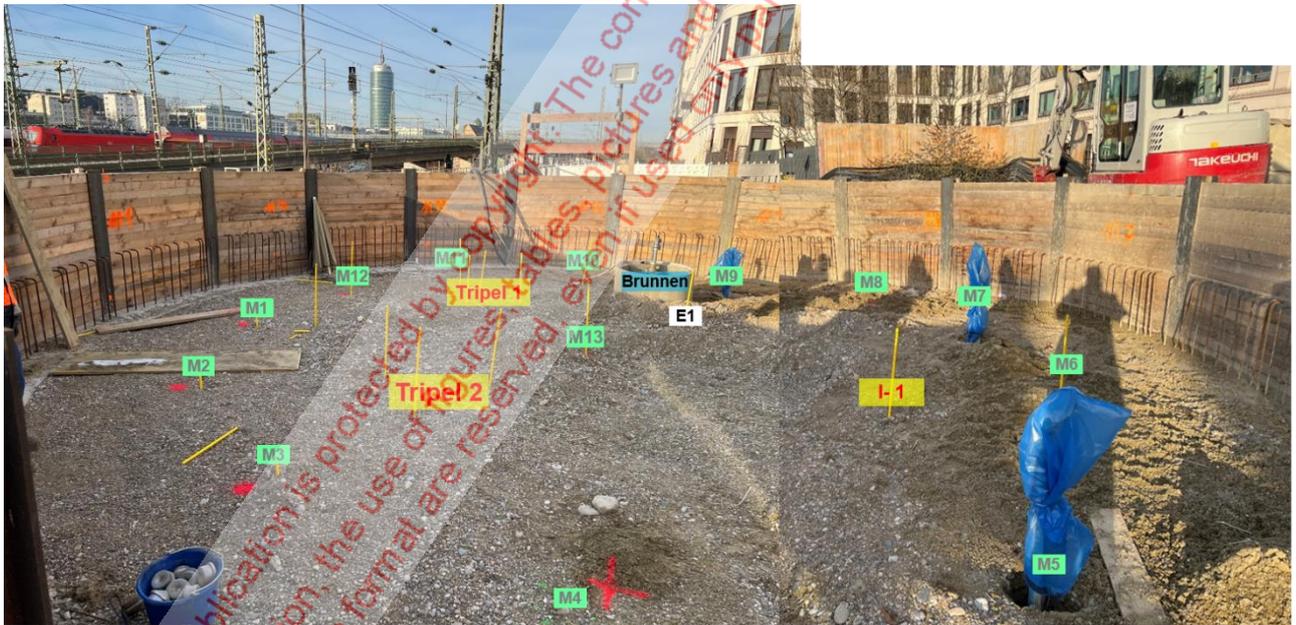


Bild 18: Blick in den Schacht mit abgesteckten Bohrungen

Die Injektionen werden mit dem Acrylatgel Rubbetite mit einer Topfzeit von ca. 60 min ausgeführt. Die Verpressungen je Bohrung erfolgen mit dem Doppelpacker von unten nach oben.

Der effektive Verpressdruck wurde mit ca. 1 bar gewählt. Systemwiderstände aus Leitung, Packer, Manschette sowie Erd- und Wasserdruck sind zusätzlich zu berücksichtigen (Bild 21).

Intensive Vorabstimmungen zu erforderlichen Baugrund-, Grundwasser- und Umweltanalysen

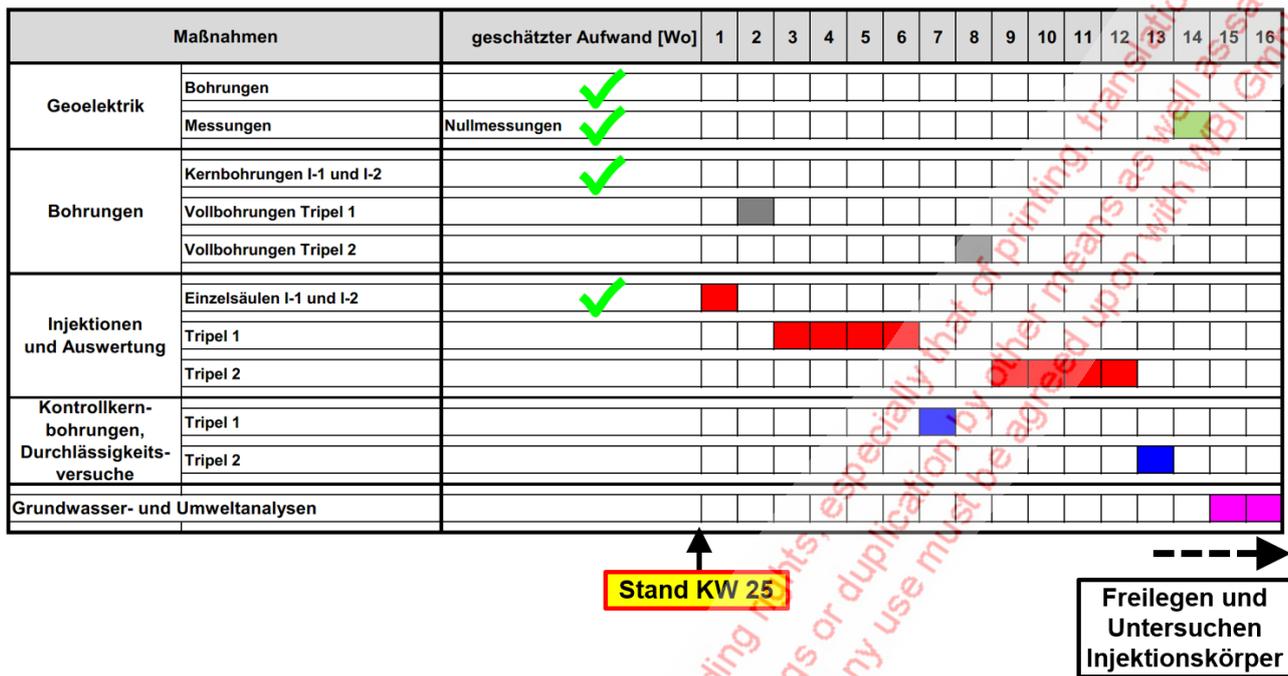


Bild 19: Versuchsprogramm und weiterer Zeitplan

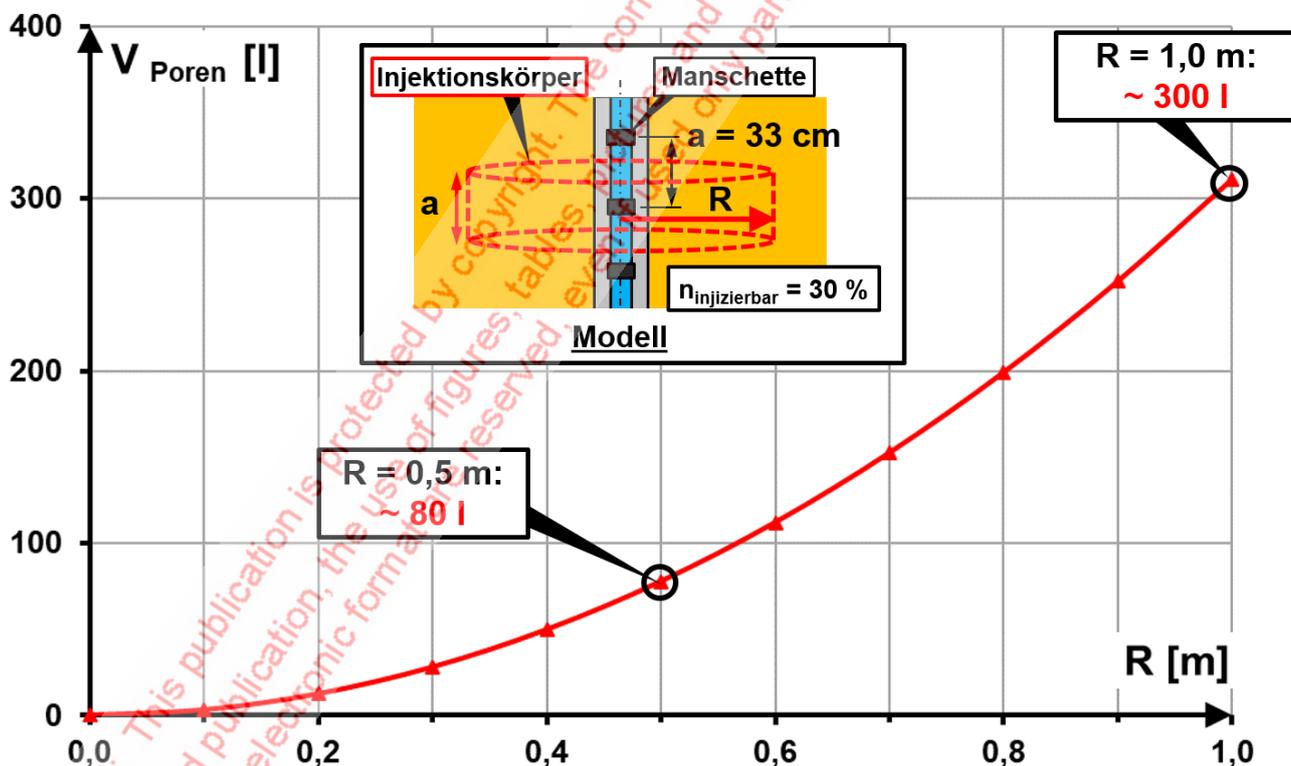


Bild 20: Abschätzung von Reichweite und Aufnahmemenge

Im Bild 22 sind die Injektionsmengen und -drücke der Schrägbohrung I-2 neben dem Bohrprofil dargestellt. Danach ist zu erkennen, dass in den Sanden des T-I und des T-II Aufnahmemengen über 300 l/Manschette erzielt werden konnten.

Injektionsgut

Acrylatgel Rubbertite

Topfzeit: ca. 60 min

Doppelpacker

Ansteuern jeder einzelnen Manschette

Injektion von unten nach oben

Injektionsdruck

Messung am Bohrlochmund

$P_{\text{effektiv}} \sim 1 \text{ bar}$

Systemwiderstand ist zusätzlich zu berücksichtigen

- Leitung und Packer: ca. 5 bar bei $q = 5 \text{ l/min}$
- Manschette: ca. 2 bar
- Erd- und Wasserdruck ca. 3 bar

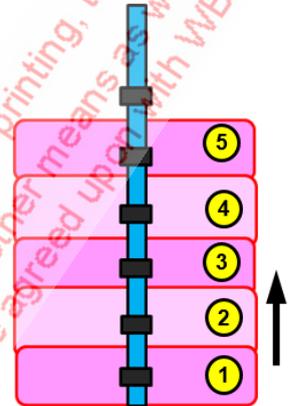


Bild 21: Injektionskonzept

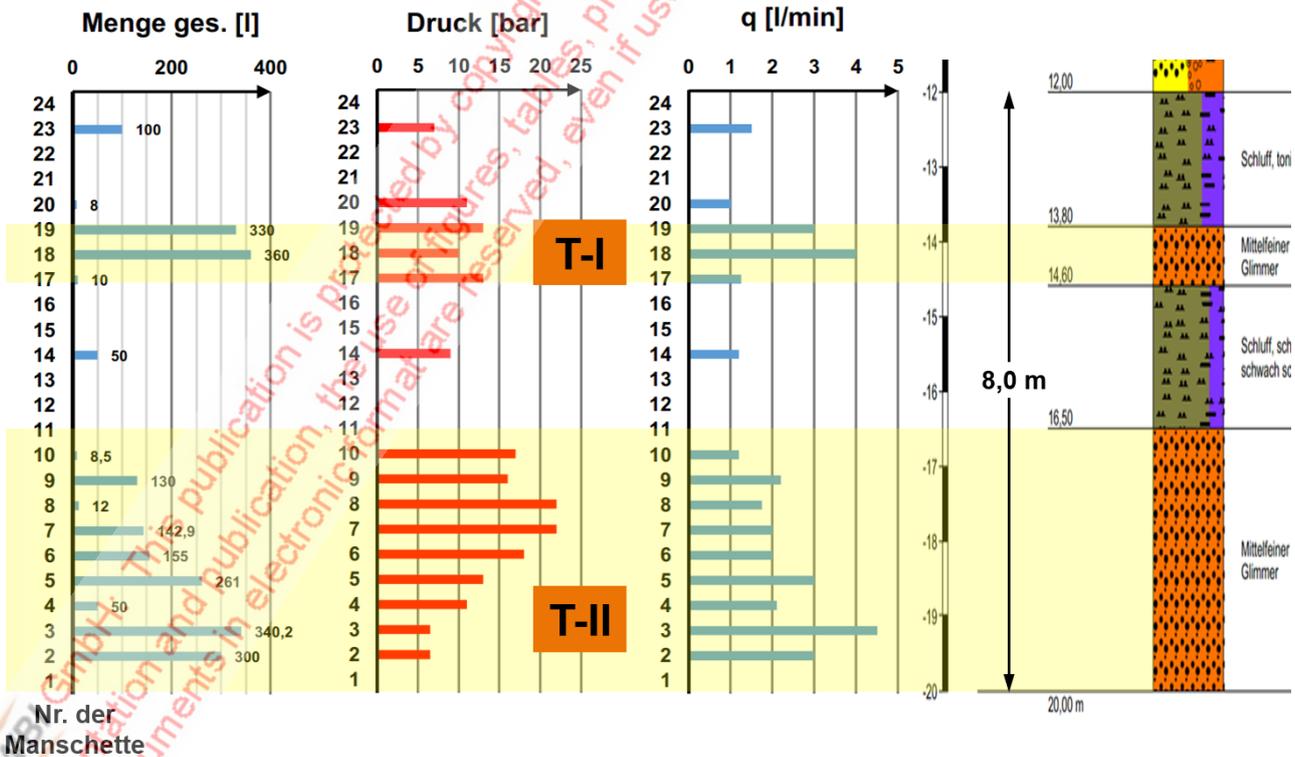


Bild 22: Injektionsmengen und Druck, Schrägbohrung I-2

In die unterste Manschette der Bohrung I-2 wurden beispielweise 300 l bei Drücken bis ca. 6,5 bar in einem Zeitraum von knapp 1,5 h verpresst (Bild 23).

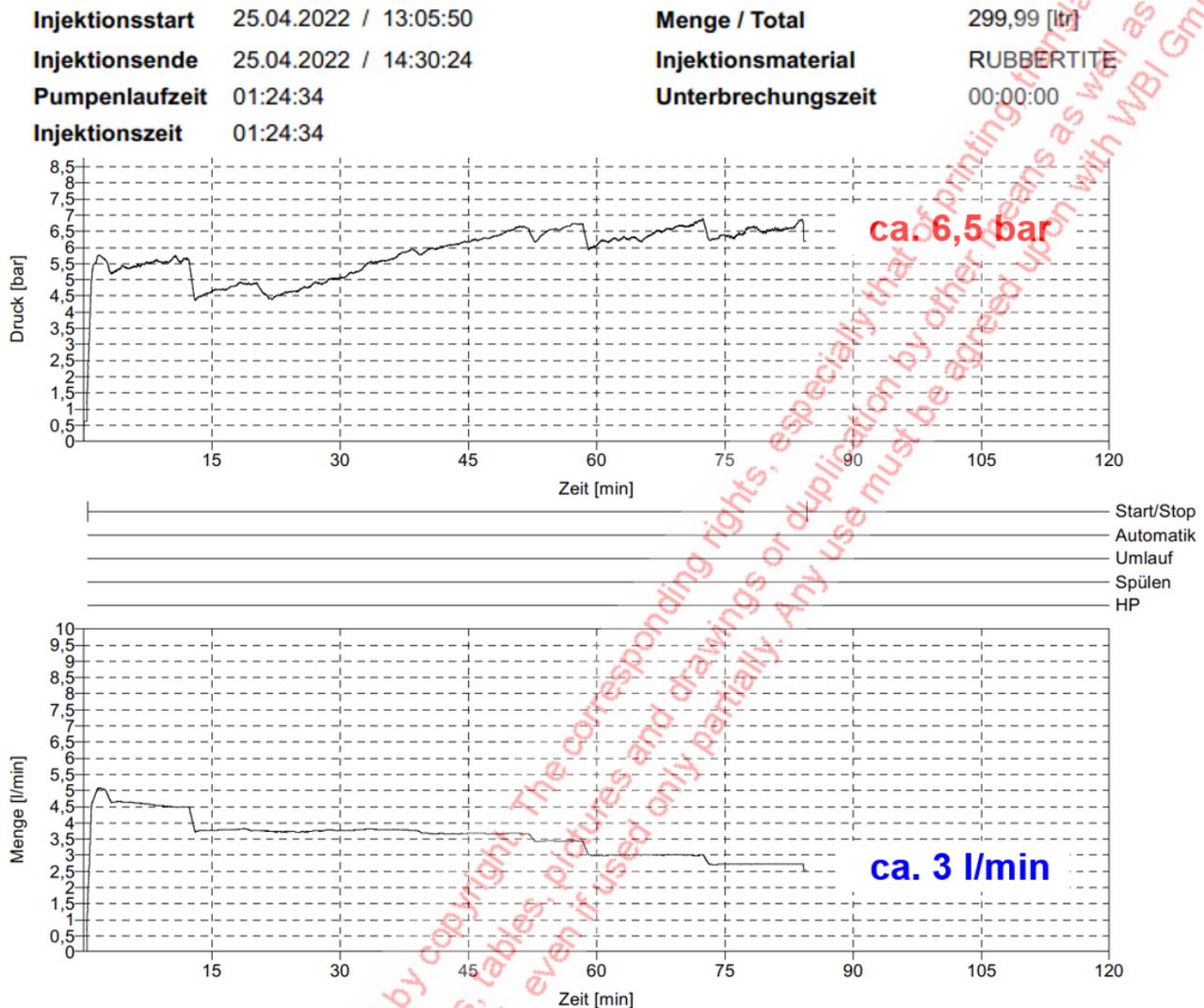


Bild 23: Druck-Mengen-Diagramm, Beispiel I-2 - Manschette 2

6. Ausblick

Der Feldversuch in München ist ein nicht kommerzieller Großversuch, in den die Forschungsergebnisse einfließen, die von TPH in den letzten 15 Jahren gewonnen wurden. Untersuchungsziel ist die Beantwortung der Frage, ob und inwieweit Injektionen zur Stabilisierung des Baugrundes prognostizierbar ausgeführt werden können. Im vorliegenden Fall liegt der Fokus auf der Injizierbarkeit tertiärer Böden. Aber auch die Injektionen von klüftigem Fels und deren Prognose waren Gegenstand der Untersuchungen der Vergangenheit.

Besondere Bedeutung kommt dem Nachweis des Injektionserfolgs zu. Aus diesem Grunde ist ein entsprechend belastbares Nachweisverfahren erforderlich. Hierzu werden Möglichkeiten mit Hilfe elektrisch-physikalischer Verfahren gesehen, die in den letzten Jahren von TPH in Zusammenarbeit mit der TU Dresden entwickelt wurden, über die im Beitrag jedoch nicht berichtet wurde.

Der Feldversuch bietet die Möglichkeit, auf der Grundlage im Vorfeld erkundeter Baugrundverhältnisse eine zielgerichtete Injektionsplanung in situ umzusetzen sowie durch die nachfolgenden Untersuchungen einschließlich des Freilegens der Injektionskörper den Verpresserfolg zu überprüfen und mit den Ergebnissen von geoelektrischen Messungen abzugleichen. Die umfangreichen Maßnahmen des Versuchs werden letztlich zu einem finanziellen Aufwand der Größenordnung von ca. 1 Mio. € führen, der von TPH getragen wird.

Literatur

Helbig, U.; Kostkanová, V.; Tintelnot, G.: Kunststoffinjektionen in wasserbaulichen Dammbauwerken. Sonderdruck Zeitschrift Georesources, 03/2018.

Stamm, J.; Helbig, U.; Kostkanová, V.; Tintelnot, G.: Abdichtung von Damm- und Deichkörpern mittels kunstharzbasierter Dichtungssysteme der Firma TPH Bausysteme GmbH. TU Dresden Mai 2017.

TPH: Grundlagenuntersuchungen zur Injizierbarkeit von Acrylatgelen, Abschlussbericht Arbeitspaket I. Universität der Bundeswehr, 20.12.2019.

TPH: Grundlagenuntersuchungen zur Injizierbarkeit und zur Festigkeitsentwicklung von Acrylatgelen, Abschlussbericht Arbeitspaket II. Universität der Bundeswehr, 09.02.2021.

Wittke, W.; Wittke, M.; Tintelnot, G.: Kunstharzinjektionen zur Abdichtung beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2014. Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2013.

Reinhardt, A.; Schmitt, D.: Ergebnisse eines Feldversuches zur Abdichtung gering durchlässigen Felses mit Acrylatgel. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-Print 20, Weinheim, 2017.

Lienhart, C.; Schmitt, D.; Wittke, M.; Wittke, W.: Planung und Ausführung von Injektionen im anhydritführenden Gipskeuper. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-Print 21, Weinheim, 2018.

Wittke, M.; Schmitt, D.; Osthoff, G.: Einpressungen von Acrylatgel und Polyurethan zur Abdichtung des anhydritführenden Gipskeupers im Bereich der Tunnel nach Ober- und Untertürkheim. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-Print 22, Weinheim, 2019.

Wittke, M.; Wittke, W.; Schmitt, D.; Osthoff, G.: Injektionen zur Abdichtung von klüftigem Fels in der Umgebung der Tunnelröhren für das Bahnprojekt Stuttgart-Ulm. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2020. Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2019.

Wittke, M.; Schmitt, D.; Reinhardt, A.: 10^{-7} - 10^{-10} m/s: Ziel erreicht - Erfolgreicher Abschluss der Injektionen Anhydrit für die Tunnel des Projekts Stuttgart 21. Vorträge anlässlich des 6. Felsmechanik- und Tunnelbautages 2021 im Rosengarten in Mannheim am 10.06.2021. WBI-Print 23, Weinheim, 2021.

© Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2014.