

Eignungsuntersuchung von Injektionsmitteln in Form von grossmassstäblichen Injektionsversuchen

Autor(en): **Niederbrucker, Richard / Paschetto, Alberto / Hellmeier, Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **17 (2012)**

Heft 2

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-349244>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eignungsuntersuchung von Injektionsmitteln in Form von grossmassstäblichen Injektionsversuchen

Richard Niederbrucker¹, Alberto Pasquetto², Paul Hellmeier³

Zusammenfassung

Im Herbst 2009 sowie im Frühjahr 2010 erfolgten grossmassstäbliche Injektionsversuche mit Injektionsharzen der Firma Uretek im Gelände des Austrian Institute of Technology GmbH, kurz AIT. Ziel der Versuche war es, die Wirksamkeit der Injektionsmittel mit Hilfe von konventionellen geotechnischen Untersuchungsmethoden nachzuweisen. Der gewählte Untersuchungsumfang umfasste Sondierungen mit der leichten Rammsonde DPL, Messungen der Dichte und des Wassergehaltes mittels Isotopensonde, Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls mit der dynamischen Lastplatte, sowie die Durchführung von Belastungsversuchen mit kreisförmiger Lastplatte (DN 600 mm). In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Belastungsversuche vorgestellt.

Die Untersuchungen erfolgten an drei unterschiedlichen natürlichen Böden ohne Injektion (Nullboden) und mit Injektion. Aus dem Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit und ohne Injektion soll die Wirksamkeit bzw. Bodenverbessernde Wirkung des Injektionsmittels dargestellt werden. Alle Versuche wurden unter klar definierten und reproduzierbaren Randbedingungen (Einbaudichte, Wassergehalt, Verdichtungsgrad) durchgeführt, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Als natürliche Bodenmaterialien wurden dabei ein nichtbindiger, rolliger Boden (Leithaschotter), und zwei bindige Böden (Tegel und Löss) verwendet.

Abstract

During autumn 2009 and spring 2010, large-scale injection experiments with injection resins from the Uretek company were carried out on the site of the Austrian Institute of Technology GmbH (AIT). The objective of these experiments was to prove the effectiveness of Uretek's injection products with the help of conventional geotechnical investigative methods. The selected scope of investigation comprised soundings with the Dynamic Penetrometer «Light» (DPL), measurements of density and water content using an isotope probe, determination of the dynamic deflection module (Evd) with the dynamic plate load test, and load tests with a circular load plate (DN 600 mm). This article presents the results of the load tests.

The experiments were conducted on three different natural soils without injection («zero soil») and with injection. On the basis of a comparison of the results obtained with and without injection, the aim was to show the effectiveness and/or the soil improvement effect of the injection product.

All the experiments were conducted under clearly defined and reproducible boundary conditions (installation density, water content, degree of compaction) so as to guarantee the comparability of the results. The natural soil materials used for this purpose were one non-cohesive, friable soil (Leitha gravel), and two cohesive soils (Tegel marl and loess).

¹ Austrian Institute of Technology GmbH, Wien, Österreich

² Uretek Srl, Bosco Chiesanuova, Italien

³ Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich

1. Allgemeines

Die Firma Uretek Injektionstechnik GmbH wurde im Jahr 2004 als Niederlassung der italienischen Uretek Srl bei Verona, die für den südeuropäischen Raum sowie Österreich, Frankreich und die Schweiz zuständig ist, gegründet. Sie befasst sich hauptsächlich mit der Verfestigung und Verbesserung des Baugrundes unterhalb instabiler Fundamente und abgesenkter Plattenfundamente. Weiters ist bei Bedarf eine gezielte Anhebung der betroffenen Fundamente in die ursprüngliche Lage möglich. Als Anwendungsbeispiele für Plattenfundamente können Industriehallenböden, Flugpisten sowie Strassenbeläge genannt werden.

2. Fundamentstabilisierung durch gezielte Injektionen mit expandierendem Kunstharz

Im Vorfeld der Injektionsarbeiten werden die erforderlichen Injektionsbohrungen mit kleinem Durchmesser (kleiner als 3 cm) punktgenau unterhalb des Fundamentes bis zur geplanten Injektionstiefe abgeteuft. Der Abstand der Injektionsbohrungen hängt von den Baugrundverhältnissen, den Fundamentabmessungen sowie den Bauwerkslasten ab und beträgt in der Regel zwischen 0,5 und 1,5 m. In die Bohrlöcher werden Injektionsrohre eingeführt, durch welche die Injektion erfolgt.

Das Injektionsmittel, ein aus zwei Komponenten gemischtes Kunstharz, wird im flüssigen Zustand injiziert und breitet sich in kürzester Zeit im Boden aus. Die dabei hervorgerufene chemische Reaktion bewirkt eine rasche Expansion und Erhärtung des Harzes. In Abhängigkeit des Bodenwiderstandes sowie der Gebäudelasten können Expansionsdrücke bis zu 10'000 kN/m² auftreten.

In Fig. 1 ist der Injektionsablauf schematisch dargestellt. Das Kunstharz dehnt sich so lange aus, bis der zu behandelnde Boden stabilisiert und eine weitere Verdichtung nicht

mehr möglich ist. Das Harz kann sich demzufolge nur noch nach oben hin ausdehnen und hebt somit den darüber liegenden Baukörper an. Die Hebung signalisiert, dass alle Hohlräume mit Harz verfüllt sind und der Baugrund bestmöglich verdichtet ist. Die Injektion kann daher genau an die Gebäudelast angepasst werden. Die millimetergenaue Überwachung und Steuerung der Hebungen erfolgt mittels Präzisionslaser.

3. Versuchsaufbau und -ablauf

Die Injektionsversuche erfolgten in drei zylindrischen Betonbehältern mit einem Durchmesser von 2 m (Brunnenringe), die mit natürlichem Boden gefüllt waren. Als natürliches Bodenmaterial wurden dabei ein nichtbindiger, rolliger Boden (Leithaschot-

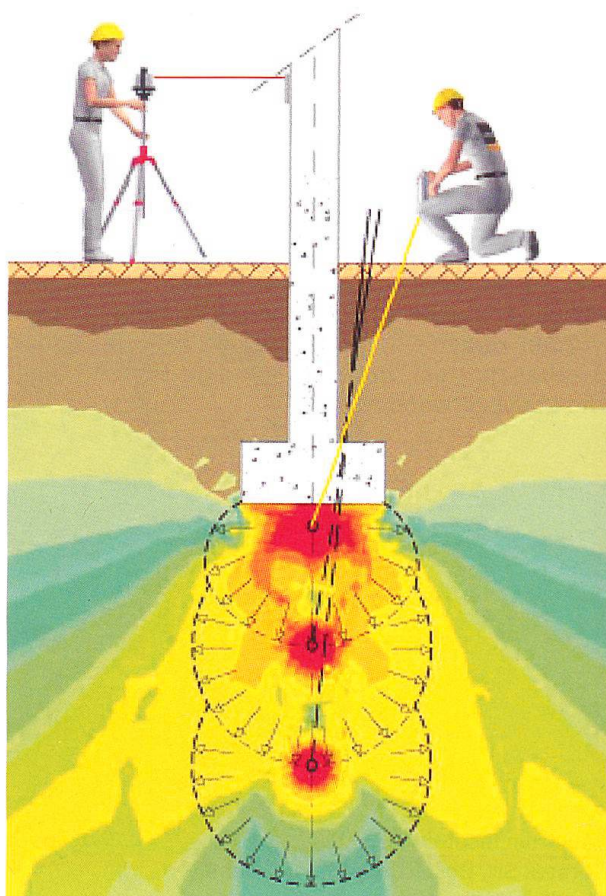


Fig. 1: Schematische Darstellung der Injektion.

ter), und zwei bindige Böden (Tegel und Löss) verwendet. Die zugehörigen Kornsummenkurven sind in Fig. 2 dargestellt. In diesen Behältern wurde für jeden Injektionsversuch als auch für den Nullversuch ein Materialvolumen von etwa 5 m³ unter annähernd gleichen Bedingungen eingebaut. Die Einbautrockendichten lagen bei den Versuchen mit Leithaschotter zwischen 2.03 und 1.93 g/cm³ bei Einbauwassergehalten von 3.2 bis 4.4%. Bei den Versuchen mit Tegel lagen die Einbautrockendichten zwischen 1.69 und 1.63 g/cm³ bei Wassergehalten des Materials von 20.5 bis 24.4%. Der Löss wurde mit Trockendichten von 1.39 bis 1.49 g/cm³ bei Wassergehalten von 15.6 bis 10.75% eingebaut. Die Injektionsversuche erfolgten mit dem Harz Geoplus[®] und einer modifizierten Variante von Geoplus[®].

Im Zuge der Belastungsversuche wurde abwechselnd an jedem Behälter ein Belastungswiderlager, bestehend aus zwei Stahlträgern, die mit Stabstählen miteinander verschraubt wurden, aufgebaut. Die Belastung des eingebauten Bodens erfolgte über eine Lastplatte von 60 cm Durchmesser mit zugehörigem hydraulischen Druckzylinder und einer Handpresse. Die Registrierung der

Plattensetzungen unter der Belastung erfolgte durch vier Wegmessuhren, welche um jeweils 90° versetzt am Plattenrand angebracht wurden. Die aufgebrachte Kraft wurde aus dem abgelesenen Pressendruck errechnet. In Fig. 3 und 4 sind ein schematischer Versuchsaufbau sowie der Hydraulikzylinder und die Belastungsplatte gezeigt. Vorteil dieses Versuchsaufbaues:

- Klar definierte Randbedingungen;
- Homogener Boden mit klar erfassbaren Parametern (Einbaudichte, Wassergehalt);
- Begutachtung des gesamten verpressten Bereiches möglich;
- Parallele Untersuchung unterschiedlicher Bodenarten an einem Standort (drei Behälter nebeneinander mit unterschiedlichen Bodentypen).

4. Ausführung der Injektionen

Vor Beginn der Injektion wurde zur Simulation einer Fundamentbelastung das Belastungswiderlager am jeweiligen Behälter aufgebaut und eine Grundlast von 20 kN/m² über die Belastungsplatte auf den eingebauten Boden aufgebracht. Die Injektionsarbei-

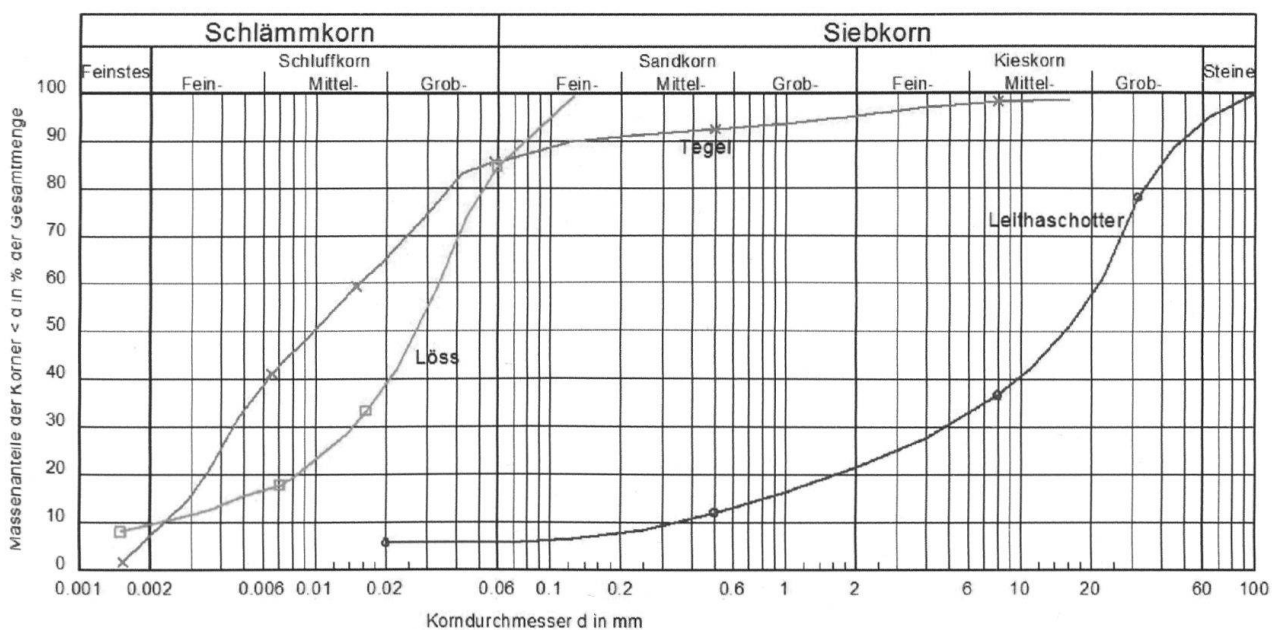


Fig. 2: Kornsummenkurven der verwendeten Materialien.

ten erfolgten durch Mitarbeiter der Firma Uretek mit dem dazugehörigen Equipment. Nach Herstellung der entsprechenden Bohrungen und Einbringung der Injektionsrohre erfolgte die Injektion in zwei Tiefenstufen. Die erste Injektion wurde in einer Tiefe von etwa 40 cm, die zweite etwa 1 m unter der Belastungsplatte (= Bodenoberfläche) in der Mitte des Behälters ausgeführt. Während der Injektionsarbeiten erfolgte die Regi-

strierung der Mengen an Injektionsgut sowie die Messung der an der Belastungsplatte aufgrund der Expansion des Harzes auftretenden Drücke und Hebungen. In Tab. 1 sind die gemessenen Daten zusammengefasst.

5. Belastungsversuche

5.1 Durchführung der Versuche

Die Belastungsversuche wurden an den nicht injizierten (Nullboden) als auch an den injizierten Böden nach Aushärtung des Injektionsmittels durchgeführt. Die Belastung erfolgte dabei stufenweise. Jede Laststufe wurde so lange aufrechterhalten bis die Verformungsgeschwindigkeit unter 0.02 mm pro Minute sank. Das Belastungsschema bestand dabei aus einer Erstbelastung, einer Entlastung und einer Wiederbelastung. Die einzelnen Laststufen mit dazugehöriger Last sind in Fig. 5 dargestellt. Die aufgebrachte Last konnte über ein kalibriertes Manometer an der Pumpe abgelesen werden. Die verwendeten Wegmessuhren haben einen Messbereich von maximal 80 mm und eine Anzeigegenauigkeit von 0.01 mm. Der Hub des Belastungszyinders beträgt 14 cm.

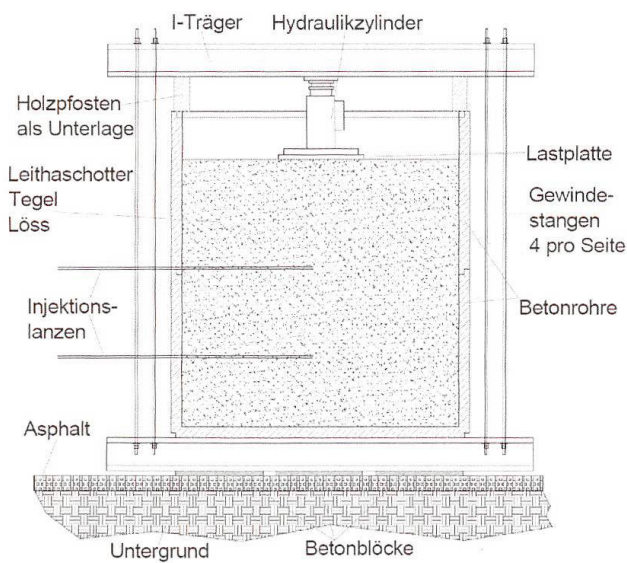


Fig. 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.



Fig. 4: Hydraulikzylinder und Lastplatte mit angesetzten Messuhren.

5.2 Ergebnisse der Belastungsversuche

In der Folge sind die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen der durchgeführten Versuche getrennt für die drei untersuchten Bodenarten dargestellt.

5.2.1 Nicht bindiger, rolliger Boden (Leithaschotter)

Der mit Geoplus sowie dem modifizierten Geoplus injizierte Leithaschotter konnte in beiden Belastungsversuchen bis zum geplanten Maximum von 500 kN/m² belastet werden. Beim nicht injizierten Boden (Nullboden) musste der Versuch aufgrund der hohen Setzungsbeiträge bei 400 kN/m² (Laststufe 17) abgebrochen werden. Das Last-Setzungsdiagramm in Fig. 6 zeigt deutlich die wesentlich geringeren Setzungen der beiden

injizierten Böden im Vergleich zum Nullboden. Bis zur Belastungsstufe 5 (200 kN/m²) zeigen die beiden injizierten Böden ein in etwa gleichartiges Verformungsverhalten. Erst ab einer Belastung von 250 kN/m² weist das modifizierte Harz bei gleicher Belastung deutlich geringere Verformungen auf. Bei der maximalen Belastung von 500 kN/m² zeigt der mit dem modifizierten Harz injizierte Boden etwa den halben Verformungsbeitrag des mit Geoplus injizierten Bodens.

Die Entlastungs- und Wiederbelastungsschleife weist bei allen drei Versuchsserien einen sehr flachen Verlauf auf, d. h. es handelt sich um plastische, bleibende Verformungen des gesamten Korngerüsts. Ein elastisches Zusammendrücken und Entspannen des expandierten Harzes ist nicht gegeben.

Die hohen Setzungen des Nullbodens sind im Wesentlichen auf dessen geringe Lage-

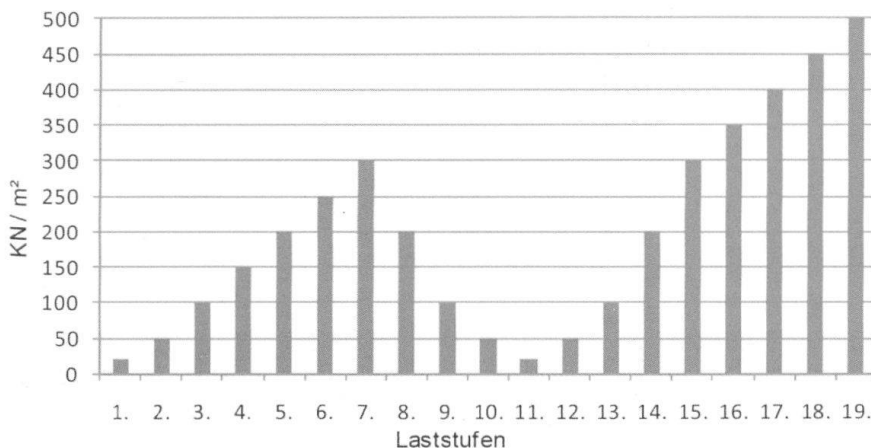


Fig. 5: Belastungsschema.

Material/Injektionsstelle	Injizierte Menge (kg)		Hebung aufgrund Injektion (mm)	
	Geoplus	mod. Geoplus	Geoplus	mod. Geoplus
Leithaschotter/obere Injektionsstelle	12.5	12.5	2.2	3.5
Leithaschotter/untere Injektionsstelle	34	34		
Tegel/obere Injektionsstelle	20	20	1.6	3.6
Tegel/untere Injektionsstelle	25	25		
Löss/obere Injektionsstelle	20	20	2.1	0.6
Löss/untere Injektionsstelle	20	20		

Tab. 1: Gemessene Daten während der Injektionen.

rungsdichte zurückzuführen. Die mittels Isotopsonde bestimmte Dichte während des Einbaues lag bei 1.93 g/cm^3 . Dies entspricht einer Lagerungsdichte von $D = 0.44$.

Neben dem Verformungsverhalten ist auch das Zeit-Setzungsverhalten der mit den beiden Injektionsmittel behandelten Böden deutlich voneinander abweichend. Das Erreichen des Abbruchkriteriums für die jeweilige Laststufe (Verformungsgeschwindigkeit $< 0.02 \text{ mm pro Minute}$) wird bei der Injektion mit dem modifizierten Harz deutlich schneller erreicht als mit dem Standardprodukt Geoplus. Die gesamte Versuchszeit zum Aufbringen aller Laststufen verringerte sich auf weniger als die Hälfte (Fig. 7).

Um eine visuelle Beurteilung der Injektion hinsichtlich der Ausbreitung des Injektionsgutes im Boden zu ermöglichen, wurden die

Injektionsbereiche nach Abschluss der Versuche freigelegt. Da die Betonringe einen Durchmesser von zwei Meter hatten, waren die Grabungsarbeiten mit einem Löffelbagger sehr schwierig.

Im rolligen Leithaschotter wurde der Porenraum vollständig vom Injektionsgut durchdrungen und es entstand ein monolithisches Konglomerat hoher mechanischer Festigkeit. Um die tiefer liegende Injektionsstelle bildete sich ein kompakter monolithischer Block aus dem Gemisch von Harz und Lockergestein (Fig. 8). Die Ausbreitung des expandierenden Harzes war bei beiden Injektionsmitteln sehr grossflächig und gleichmässig. Fig. 9 zeigt eine Nahaufnahme des injizierten Materials. An der Oberfläche war kein Austritt zu beobachten.

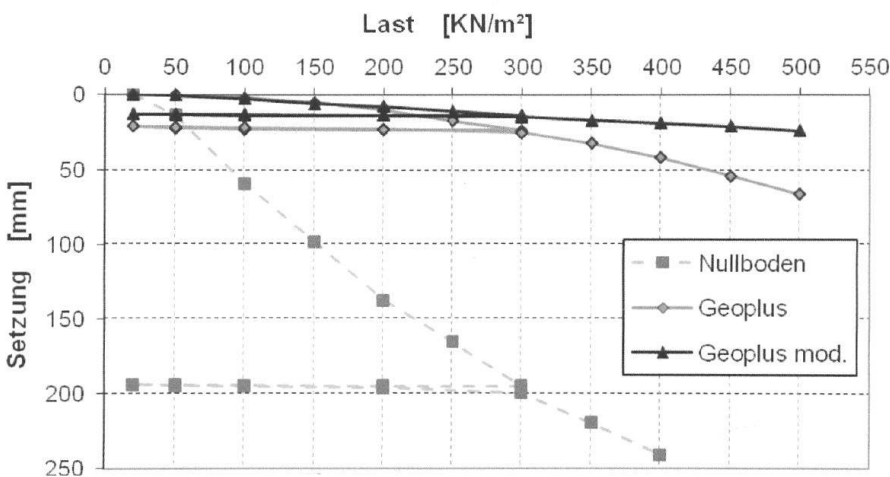


Fig. 6: Last-Setzungslinie für die Leithaschotter.

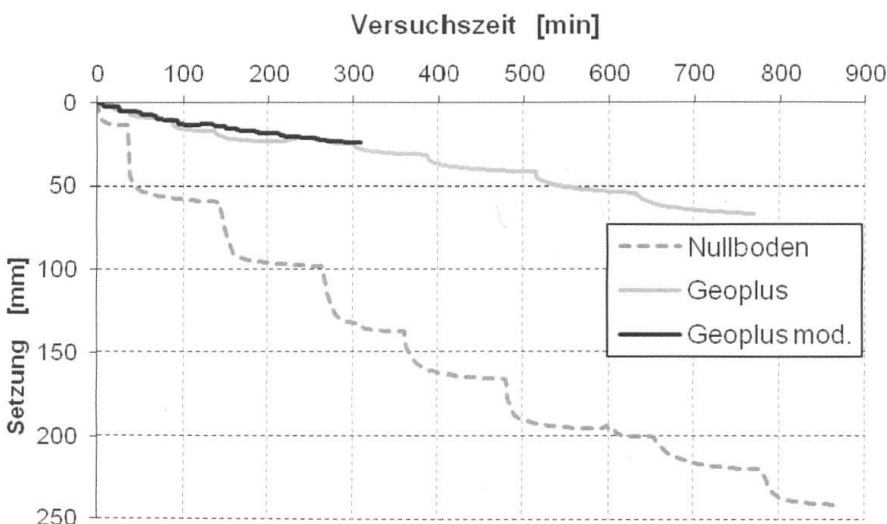


Fig. 7: Zeit-Setzungslinie für die Leithaschotter.

5.2.2 Bindiger Boden (Tegel)

Der mit Geoplas injizierte Tegel konnte bis zu einer Last von 400 kN/m^2 , jener mit modifiziertem Geoplas injizierte bis 300 kN/m^2 belastet werden. Der Versuch am nicht injizierten, natürlichen Boden musste auf Grund der starken Setzungen bei 200 kN/m^2 beendet werden. Daher konnte auch keine Entlastungs- und Wiederbelastungsschleife ermittelt werden. Die Last-Setzungslinie

zeigt hier bereits in der zweiten Laststufe hohe Setzungen. Der weitere, steil abfallende Verlauf der Linie in den folgenden Laststufen zeigt deutlich das Versagen des Bodens (Fig. 10).

Demgegenüber ist die verbessernde Wirkung der Injektionen auf das Setzungsverhalten unter Belastung als sehr gut zu bezeichnen. Die Setzungen bei den Laststufen bis 200 kN/m^2 können um etwa den Faktor 10 verringert werden. Die weiteren Laststufen



Fig. 8: Injektionsbereich in Leithaschotter.



Fig. 9: Nahaufnahme der Injektion.

zeigen jedoch auch bei den injizierten Böden eine stärkere Zunahme der Setzungen, wobei jedoch der Bruchzustand des Bodens bei Weitem nicht erreicht wird.

Die Entlastungsschleife bei 300 kN/m² weist bei den injizierten Böden einen sehr flachen Verlauf auf, d. h. es handelt sich um eine plastische Verformung des Bodens. Ein elastisches Zusammendrücken und Entspannen des expandierten Harzes erscheint nicht gegeben.

Aufgrund einer Beschädigung des Betonringes durch das Entleeren und Wiederbefüllen mit Boden konnte der Versuch mit dem modifizierten Geoplus nicht weiter als bis zur Laststufe 7 (300 kN/m²) durchgeführt werden. Bei dieser Belastung öffnete sich ein bestehender durchgehender, senkrechter Riss an der Mantelfläche. Eine weitere Belastung hätte unter Umständen zum Bruch des gesamten Betonringes geführt. Aufgrund

dieser Bruchstelle kam es zu höheren Setzungsbeträgen, wobei die dabei gewonnenen Versuchsergebnisse als nicht repräsentativ anzusehen sind.

Beim Tegel bildeten die Injektionsmittel ein lamellenförmiges Netz im Boden (Fig. 12, 13). Durch diese Lamellenstruktur kam es einerseits zu einer lokalen Verdichtung des Bodens im Nahbereich der Lamellen und andererseits zu einer Armierung des Bodens aufgrund der Lammellenstruktur. Das modifizierte Geoplus besitzt einen weitaus geringeren Expansionsdruck, der freigelegte Injektionsbereich reichte daher nicht bis zur Bodenoberkante, sondern endete etwa 30 cm darunter. Bei der Durchführung der Injektion mit dem modifizierten Geoplus waren daher auch keine Austritte von Injektionsgut an der Bodenoberfläche zu beobachten.

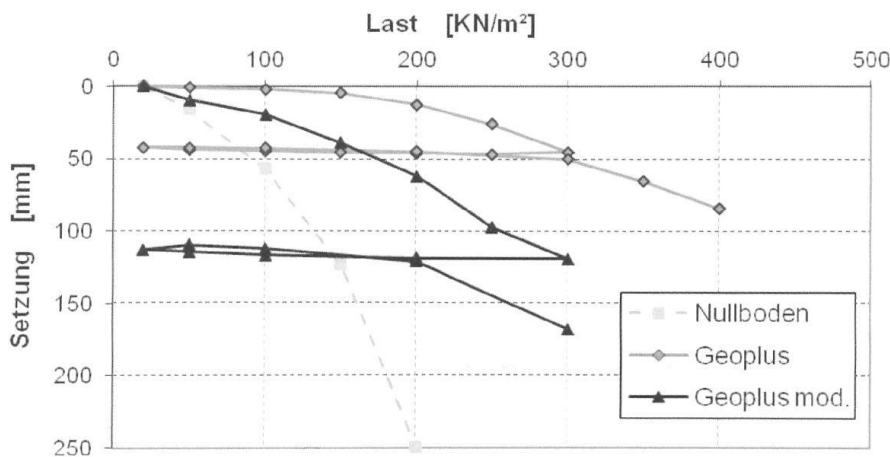


Fig. 10: Last-Setzungslinie für Tegel.

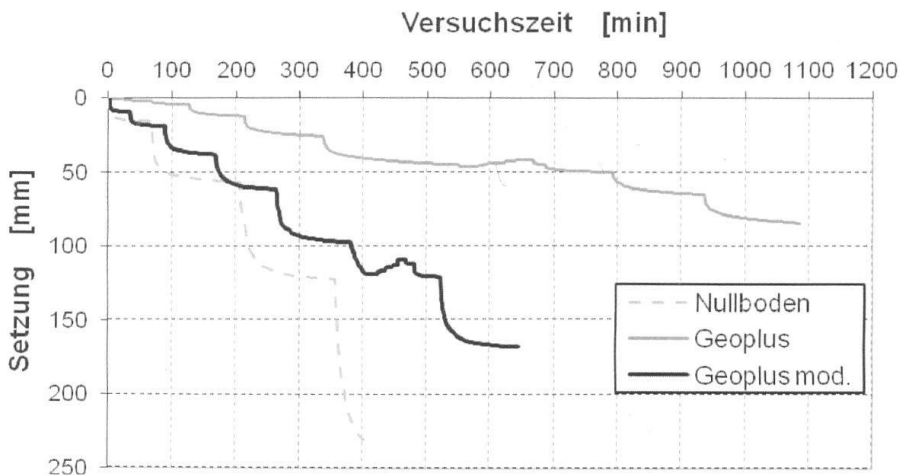


Fig. 11: Zeit-Setzungslinie für Tegel.

5.2.3 Bindiger Boden (Löss)

Beim nicht injizierten Lössboden (Nullboden) traten bereits in der ersten Laststufe sehr hohe Setzungen auf. Die zugehörige Last-Setzungslinie fällt steil nach unten ab. Aufgrund der hohen Setzungen musste der Belastungsversuch bereits bei Laststufe 2 (200 kN/m²) abgebrochen werden (Fig. 14). Die Kurve zeigt deutlich das Versagen des Nullbodens bereits bei geringen Belastun-

gen. Eine Tragfähigkeit ist daher nicht gegeben.

Der injizierte Löss konnte ebenfalls nicht bis zum geplanten Maximum von 400 kN/m² belastet werden. Der Versuch musste bei Laststufe 4 (250 kN/m²) abgebrochen werden. Die verbessernde Wirkung der Injektionen auf die Tragfähigkeit und das Setzungsverhalten des Bodens ist jedoch als sehr gut zu bezeichnen. Der Betrag der Setzungen bei den Laststufen bis 100 kN/m² konnte um



Fig. 12: Oberer Injektionsbereich im Tegel.



Fig. 13: Lammellenförmige Ausbreitung im Tegel.

etwa den Faktor 10 verringert werden. Die weiteren Laststufen zeigen eine starke Zunahme der Setzungen. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit aufgrund der Injektion ist jedoch deutlich erkennbar. Bei Verwendung des modifizierten Injektionsmittels zeigten sich dabei noch geringere Setzungsbeträge als bei der Verwendung des Standardharzes Geoplus. Besonders bei den Laststufen 3 und 4 verringern sich die Setzungen deutlich.

Auch bei den Zeit-Setzungslinien in Fig. 15 zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Injektionsmitteln. Die Zeitdauer bis zum Erreichen einer minimalen Setzungsgeschwindigkeit von 0.02 mm/min, welche das Beenden der jeweiligen Laststufe bedeutet, ist bei Verwendung des modifizierten Harzes deutlich geringer.

Bedingt durch die sehr lockere Lagerung des Lössbodens bildete das Harz beim Austritt aus dem Injektionsrohr einen grossen, senkrecht stehenden, scheibenförmigen Körper (Fig. 16). Im Zuge der weiteren Expansion des Harzes formten sich starke, zur Oberfläche hin orientierte Lamellen. In weiterer Folge traten geringe Mengen an Injektionsgut an der Oberfläche aus. Mittels der Expansionskraft konnte das Harz den lockeren Boden verdrängen und aufgrund der geringeren Dichte stieg es nach oben.

6. Zusammenfassung

Ziel der Versuche war es, die positive Auswirkung der Injektionsmittel Geoplus und Geoplus modifiziert auf die Tragfähigkeit

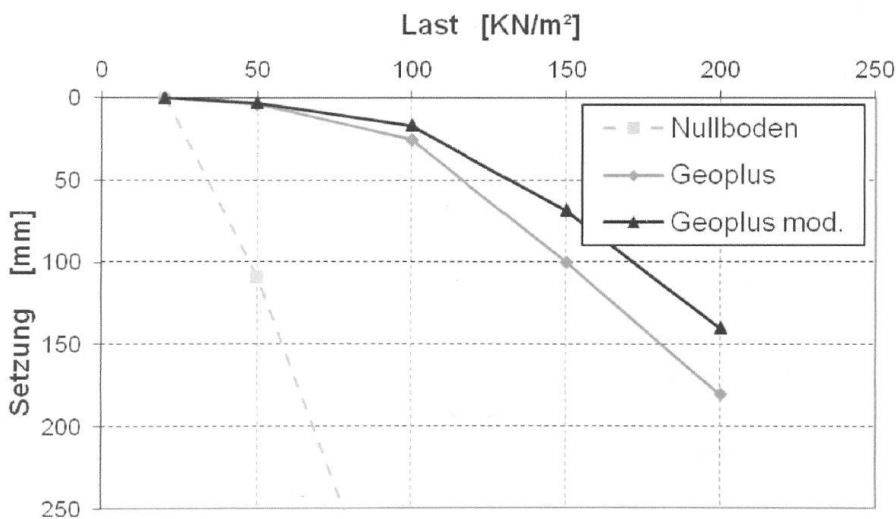


Fig. 14: Last-Setzungslinie für Löss.

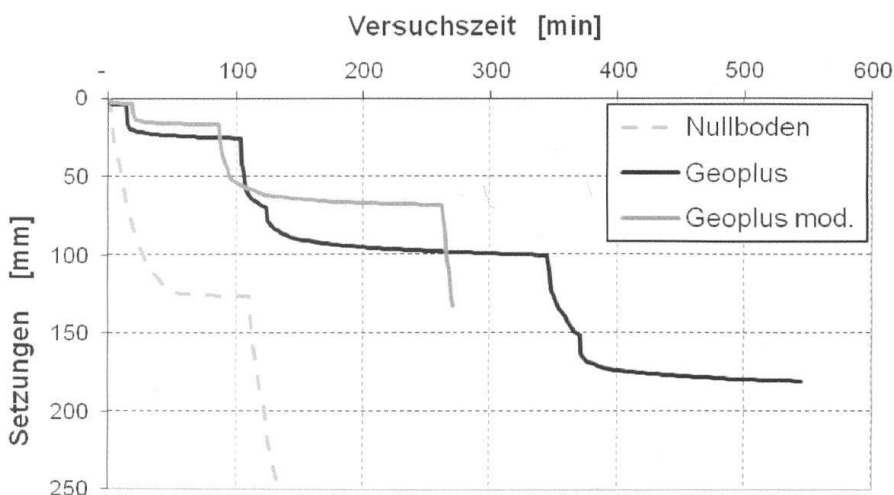


Fig. 15: Zeit-Setzungslinie für Löss.

und das Setzungsverhalten von unterschiedlichen natürlichen Böden mit Hilfe von Belastungsversuchen mit kreisförmiger Lastplatte (DN 600 mm) nachzuweisen. Als natürliches Bodenmaterial wurden dabei ein nichtbindiger, rolliger Boden (Leithaschotter), und zwei bindige Böden (Tegel und Löss) verwendet. Diese Lockergesteinsböden sind in Österreich weit verbreitet und können daher als repräsentativ angesehen werden. Alle Versuche wurden unter klar definierten und reproduzierbaren Randbedingungen (Einbaudichte, Wassergehalt, Verdichtungsgrad) durchgeführt, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

Die aus den durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Aus den Ergebnissen der Belastungsversuche ist deutlich eine positive Wirkung der expandierten und ausgehärteten Injektionsmittel Geoplus und Geoplus modifiziert auf das Verformungsverhalten sowie die Tragfähigkeit der untersuchten Bodenarten feststellbar.
- Bei dem untersuchten nichtbindigen, rolligen Boden (Leithaschotter) konnten durch die Injektion die Setzungen aufgrund der simulierten Fundamentbelastung deutlich verringert werden. Die Last-Setzungskurve ist bei den injizierten Böden deutlich flacher geneigt als beim Nullboden. Die Entlastungsschleife zeigt einen annähernd waagrechten Verlauf, daher handelt es sich um plastische Verformungen. Ein elastisches Zusammendrücken und Entspannen des expandierten Harzes ist daher nicht gegeben. Der freigelegte Injektionsbereich zeigt ein vollständiges Durchdringen der Hohlräume mit Injektionsmittel, was zur Bildung einer konglomeratartigen Bodenstruktur führte. Die Ausbreitung des Harzes war sehr grossflächig und gleichmässig. Unterschiede zwischen den beiden Injektionsmitteln sind deutlich erkennbar. Der mit modifiziertem Harz Geoplus verbesserte Boden weist noch geringere Setzungen auf als jener mit dem Standardprodukt Geoplus injizierte.
- Bei den untersuchten bindigen Böden (Tegel, Löss) konnten durch die Injektion ebenfalls die Setzungen, die aufgrund der Versuchsbelastung auftraten, sehr deutlich reduziert werden. Darüber hinaus wird jedoch auch die Tragfähigkeit deutlich verbessert. Sehr deutlich erkennbar

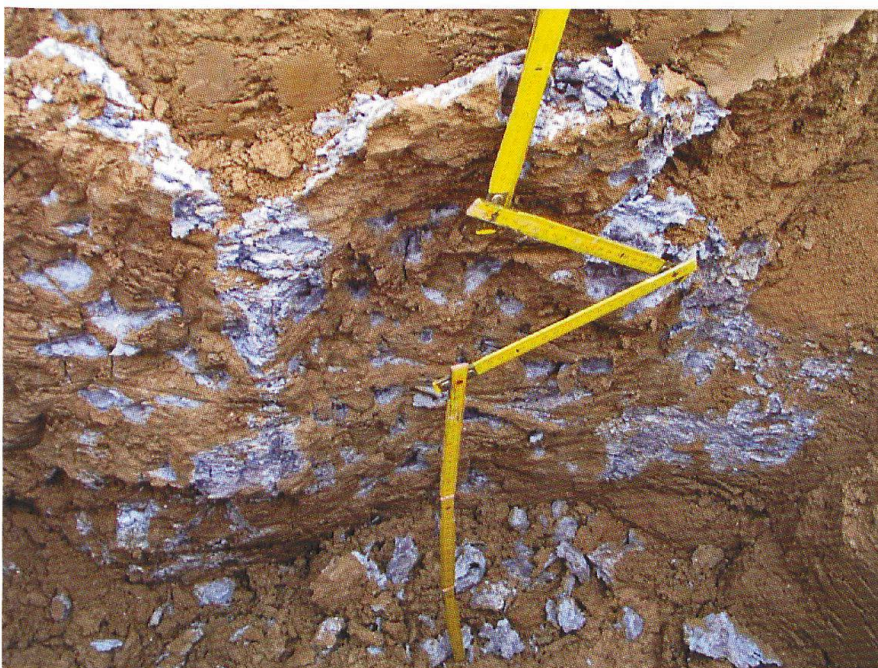


Fig. 16: Lamellenförmige Ausbreitung des Injektionsmittels in Löss.

ist dies bei Betrachtung der Last-Setzungslinien des Tegels. Der nicht injizierte Tegel erreicht seine Grenztragfähigkeit bereits bei etwa 200 kN/m^2 , der mit Geoplus injizierte Boden hingegen kann bis zum Maximum von 400 kN/m^2 belastet werden. Das Harz bildete im Tegel ein Netz feiner scheibenförmiger Lamellen aus. Durch diese Lamellenstruktur kommt es einerseits zu einer lokalen Verdichtung des Bodens im Nahbereich der Lamellen und andererseits zu einer Armierung des Bodens aufgrund der Lammellenstruktur. Der Versuch mit dem modifizierten Geoplus ist aufgrund des gebrochenen Betonringes als nicht repräsentativ anzusehen. Wegen des sich bei steigender Belastung immer weiter öffnenden Risses musste der Belastungsversuch vorzeitig abgebrochen werden.

- Der untersuchte Lössboden stellte aufgrund der sehr lockeren Lagerung einen Sonderfall dar. Beim nicht injizierten Boden war bereits bei den ersten Laststufen die Grenztragfähigkeit erreicht. Mit Injektion konnte jedoch die doppelte Belastung (100 kN/m^2) bei noch vertretbaren Setzungen aufgebracht werden, was eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit bei gleichzeitiger starker Reduktion der auftretenden Setzungen bedeutet.
- Das modifizierte Geoplus zeigt beim Leithaschotter als auch beim Löss eine weitere deutliche Reduktion der Setzungen gegenüber dem Standardprodukt Geoplus. Auch ist die Dauer der einzelnen Laststufen bis zum Erreichen einer minimalen Setzungsgeschwindigkeit bei den Versuchen mit modifiziertem Geoplus deutlich geringer. Diese Effekte sind auf die höhere Dichte und somit geringere Verformbarkeit dieses Harzes im expandierten Zustand zurückzuführen.