

R E P O R T

Injektionsversuche mit dem Harz Geoplus® der Firma Uretek

Auftraggeber:

Uretek Injektionstechnik GmbH

Anschrift:

Mooslackengasse 17
1190 Wien

Autor:

DI Richard Niederbrucker

März 2010
Exemplar 1
AIT-HE-0036

INHALT

KURZZUSAMMENFASSUNG	2
ALLGEMEINES.....	2
TECHNISCHE DOKUMENTATION GEOPLUS® - ZUSAMMENFASSUNG	2
<i>Injektionsprinzip</i>	2
<i>Art und Zusammensetzung des Injektionsgutes.....</i>	2
<i>Parameter und Kriterien.....</i>	2
<i>Umweltaspekte.....</i>	3
EIGNUNGSUNTERSUCHUNGEN IN FORM VON GROßMAßSTÄBLICHEN INJEKTIONSVERSUCHEN.....	3
1 ALLGEMEINES	5
1.1 ALLGEMEINES - BEAUFTRAGUNG	5
1.2 UMFANG DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN	5
1.3 VERWENDETE LITERATUR	5
TEIL 1:TECHNISCHE DOKUMENTATION GEOPLUS®.....	6
A) TECHNISCHE DOKUMENTATION	6
INJEKTIONSGUT.....	6
<i>Art und Zusammensetzung</i>	6
<i>Umweltaspekte.....</i>	6
<i>Parameter und Kriterien.....</i>	6
INJEKTIONSPRINZIP UND –VERFAHREN	7
<i>Injektionsprinzip</i>	7
<i>Injektionsverfahren.....</i>	7
AUSFÜHRUNG	7
<i>Bohren</i>	7
<i>Aufbereitung des Injektionsgutes</i>	7
<i>Pumpen und Verteilung</i>	7
<i>Injektion / Injektionsablauf.....</i>	8
<i>Bauüberwachung, Prüfung und Kontrolle.....</i>	8
B) PRÜFUNGEN UND UNTERSUCHUNGEN.....	9
GRUNDSATZPRÜFUNGEN.....	9
<i>Mechanische Eigenschaften des Harzes Geoplus®.....</i>	9
• <i>Einaxiale Druckfestigkeit.....</i>	9
• <i>Einaxiale Zugfestigkeit.....</i>	10
• <i>Kraft- Verformungsverhalten.....</i>	10
• <i>Kriechverhalten unter dynamischer Belastung</i>	10
<i>Chemische Eigenschaften- Toxizität.....</i>	11
• <i>Eluatuntersuchungen</i>	11
• <i>Bestimmung der Ökotoxizität.....</i>	11
EIGNUNGSPRÜFUNG.....	11
TEIL 2: GROßMAßSTÄBLICHE INJEKTIONSVERSUCHE	12
ALLGEMEINES- VERSUCHSAUFBAU	12
ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN DER GEOTECHNISCHEN UNTERSUCHUNGEN	14
<i>Nicht bindiger, rolliger Boden - Leithaschotter:</i>	14
<i>Bindiger Boden – Tegel</i>	18
<i>Bindiger Boden – Löss.....</i>	22
ZUSAMMENFASSUNG UND INTERPRETATION DER GROßMAßSTÄBLICHEN INJEKTIONSVERSUCHE	26

Kurzzusammenfassung

Allgemeines

Das Verfahren zur Konsolidierung und damit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Böden unter Fundamenten mit Hilfe von expandierenden Harzen wurde von der Firma Uretek entwickelt und patentiert. Das dabei verwendete Injektionsmittel Geoplus® wird bereits weltweit eingesetzt.

In Österreich wird diese Methode noch wenig eingesetzt, da Erfahrungen weitgehend fehlen und die rechtlichen und normativen Voraussetzungen für den Einsatz unklar sind.

Die Austrian Institute of Technology GmbH wurde daher von der Uretek Injektionstechnik GmbH mit der Erstellung einer technischen Dokumentation aus bestehenden Unterlagen sowie der Durchführung von generellen Eignungsuntersuchungen des Produktes Geoplus® in Form von großmaßstäblichen Injektionsversuchen beauftragt.

Technische Dokumentation Geoplus® - Zusammenfassung

Injektionsprinzip

Das gegenständliche Produkt, bzw. Verfahren ist als Injektion mit Baugrundverdrängung (Verdichtungsinjektion, hydraulische Aufbrecheinjektion) zu bezeichnen. Durch den starken Expansionsdruck des injizierten Harzes erfolgt eine Verdichtung des umgebenden Bodens im Nahbereich der Injektion.

Art und Zusammensetzung des Injektionsgutes

Bei dem Injektionsgut Geoplus® handelt es sich um ein Zweikomponenten Polyurethan System, das im Wesentlichen aus Polyolen und Isocyanaten besteht. Das Injektionsgut wird als Lösung in den Boden eingebracht und polymerisiert unter Volumsvergrößerung. Die beiden Systemkomponenten werden mit Geoplus® A und Geoplus® B bezeichnet.

Parameter und Kriterien

Expansionsdruck:	Der Expansionsdruck des Zwei-Phasen-Gemisches beträgt 10.000 KPa, mit zunehmendem Expansionsgrad nimmt diese ab bis im Boden ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.
Expansionsgrad:	Der Expansionsgrad des Produktes Geoplus® liegt in Abhängigkeit des Bodenwiderstandes zwischen 200 und 2000% des injizierten Harzvolumens.
Reaktionszeit:	
Mechanische Festigkeit:	Die mechanische Festigkeit des expandierten und erhärteten Harzes richtet sich nach dem Expansionsgrad. Bei Wichten von 0,5 bis 3,3 kN/m ³ wurden Festigkeiten von 0,2 bis 6,0 MPa ermittelt.
Alterungsbeständigkeit:	Auf die durchgeführten Injektionsarbeiten gibt Uretek eine Garantie von 10 Jahren. Aufgrund von langjährigen Erfahrungen ist das injizierte Material jedoch weit über diesen Zeitraum beständig.
Wichte:	Die Wichte des injizierten Harzes ist abhängig vom Expansionsgrad im Boden und beträgt zwischen 150 und 300 kg/m ³ .

Wasserdurchlässigkeit: Das expandierte und erhärtete Harz besitzt einen Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten von $k_f = 10^{-8}$ m/s. Dies entspricht in etwa der Durchlässigkeit eines Lehm-bodens. In nicht bindigen Böden verringert das Harz die Permeabilität und verhindert Suffosions- und Erosionserscheinungen.

Umweltaspekte

Bodentoxikologische Untersuchungen wurden an Proben des ausgehärteten Polyurethanschaums durchgeführt. Eine Einstufung als giftig oder schädlich, was zu einer Kennzeichnung mit R 54 (Giftig für Pflanzen) führen würde, ist nicht angezeigt.

Weiters wurden im Zuge eines Projektes Auslaugungsversuche an injizierten Bodenproben durchgeführt. Es ergaben sich dabei keine Bedenken gegen den Einsatz des Produktes Geoplus®.

Eignungsuntersuchungen in Form von großmaßstäblichen Injektionsversuchen

Ziel der Untersuchungen war es, die positive Auswirkung des Injektionsmittels Geoplus® auf die Tragfähigkeit von unterschiedlichen natürlichen Böden mit konventionellen geotechnische Untersuchungsmethoden nachzuweisen. Der gewählte Untersuchungsumfang umfasste Sondierungen mit der leichten Rammsonde DPL, Messungen der Dichte und des Wassergehaltes mit Isotopensonde, Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls mit der dynamischen Lastplatte, sowie die Durchführung von Belastungsversuchen mit kreisförmiger Lastplatte (DN 600 mm).

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 des expandierten und ausgehärteten Injektionsmittels Geoplus® 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 deutlich flacher geneigt. Die Entlastungsschleife zeigt einen annähernd waagrechten Verlauf, es handelt sich daher 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.
- Bei den untersuchten bindigen Böden (Tegel, Löss) konnten durch die Injektion ebenfalls die Setzungen aufgrund der Versuchsbelastung sehr deutlich reduziert werden. Darüber hinaus wird jedoch auch die Tragfähigkeit deutlich verbessert. Sehr deutlich erkennbar ist dies bei Betrachtung der Last-Setzungslinien des Tegels. Der nicht injizierte Tegel erreicht seine Grenztragfähigkeit bereits bei etwa 200kN/m², der mit Geoplus® injizierte Boden hingegen kann bis zum Maximum von 400 kN/m²

belastet werden. Das Harz bildete im Tegel ein Netz feiner 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 untersuchte Lössboden stellte aufgrund der sehr lockeren Lagerung einen Sonderfall dar. Beim nicht injizierten Boden ist bereits bei den ersten Laststufen die Grenztragfähigkeit erreicht. Mit Injektion kann jedoch eine Belastung bis 100 kN/m^2 bei noch vertretbaren Setzungen aufgebracht werden, was eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit bei gleichzeitiger starker Reduktion der auftretenden Setzungen bedeutet.

1 Allgemeines

1.1 Allgemeines - Beauftragung

Das Verfahren zur Konsolidierung und damit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Böden unter Fundamenten mit Hilfe von expandierenden Harzen wurde von der Firma Uretek entwickelt und patentiert. Das dabei verwendete Injektionsmittel Geoplus® wird weltweit eingesetzt.

In Österreich wird diese Methode noch wenig eingesetzt, da Erfahrungen weitgehend fehlen und die rechtlichen und normativen Voraussetzungen für den Einsatz unklar sind.

Die Austrian Institute of Technology GmbH wurde daher von der Uretek Injektionstechnik GmbH mit der Erstellung einer technischen Dokumentation aus bestehenden Unterlagen sowie der Durchführung von generellen Eignungsuntersuchungen des Produktes Geoplus® in Form von großmaßstäblichen Injektionsversuchen beauftragt.

1.2. Umfang der durchgeführten Arbeiten

In Folge werden die durchgeführten Arbeiten in zwei Teilen dargestellt:

- Teil 1: Technische Dokumentation - Zusammenstellung der an dem Produkt Geoplus® durch verschiedene Prüfanstalten bereits durchgeführten Untersuchungen.
- Teil 2: Bericht über die durchgeführten großmaßstäblichen Injektionsversuche mit dem Produkt Geoplus® an unterschiedlichen Lockergesteinsböden.

1.3. Verwendete Literatur

Im Zuge der Berichtserstellung wurde folgende Literatur verwendet:

- Einschlägige Normen und Richtlinien
- Technische Anmerkungen und Ergebnisse der Laborversuche am expandierendem Harz der neuesten Generation Uretek Geoplus®, technisches Team Uretek in Zusammenarbeit mit der Universität Padua
- Chemisch/toxikologische Untersuchungen eines Zweikomponenten –Polyurethan Systems, Geoplus® A /Geoplus® B, Hygiene- Institut des Ruhrgebietes
- Uretek- Schaum, Bewertung aus wasserhygienischer Sicht, Hygiene- Institut des Ruhrgebietes
- Sicherheitsdatenblätter Geoplus® A und Geoplus® B, Resina Chemie B.V.
- Ermittlung der Produkteigenschaften von URETEK- Expansionsharzproben, iFB Gauer

TEIL 1: TECHNISCHE DOKUMENTATION GEOPLUS®

Diese technische Dokumentation folgt den relevanten Kapiteln der ÖNORM EN 12715, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau)- Injektionen, und nimmt Bezug auf die in der ÖNORM B 4454 angeführten Prüfungen.

A) Technische Dokumentation

INJEKTIONSGUT

Art und Zusammensetzung

Bei dem Injektionsgut Geoplus® handelt es sich um ein Zweikomponenten Polyurethan System, das im Wesentlichen aus Polyolen und Isocyanaten besteht. Das Injektionsgut wird als Lösung in den Boden eingebracht und polymerisiert unter Volumsvergrößerung. Die beiden Systemkomponenten werden mit Geoplus® A und Geoplus® B bezeichnet.

Umweltaspekte

Bodentoxikologische Untersuchungen wurden an Proben des ausgehärteten Polyurethanschaums durchgeführt. Eine Einstufung als giftig oder schädlich, was zu einer Kennzeichnung mit R 54 (Giftig für Pflanzen) führen würde, ist nicht angezeigt.

Weiters wurden im Zuge eines Projektes Auslaugungsversuche an injizierten Bodenproben durchgeführt. Es ergaben sich dabei keine Bedenken gegen den Einsatz des Produktes Geoplus®.

Parameter und Kriterien

Expansionsdruck:	Der Expansionsdruck des Zwei-Phasen-Gemisches beträgt 10.000 KPa, mit zunehmendem Expansionsgrad nimmt diese ab bis im Boden ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.
Expansionsgrad:	Der Expansionsgrad des Produktes Geoplus® liegt in Abhängigkeit des Bodenwiderstandes zwischen 200 und 2000% des injizierten Harzvolumens.
Reaktionszeit:	
Mechanische Festigkeit:	Die mechanische Festigkeit des expandierten und erhärteten Harzes richtet sich nach dem Expansionsgrad. Bei Wichten von 0,5 bis 3,3 kN/m ³ wurden Festigkeiten von 0,2 bis 6,0 MPa ermittelt.
Alterungsbeständigkeit:	Auf die durchgeführten Injektionsarbeiten gibt Uretek eine Garantie von 10 Jahren. Aufgrund von langjährigen Erfahrungen ist das injizierte Material jedoch weit über diesen Zeitraum beständig.
Wichte:	Die Wichte des injizierten Harzes ist abhängig vom Expansionsgrad und beträgt zwischen 150 und 300 kg/m ³ .

Wasserdurchlässigkeit: Das expandierte und erhärtete Harz besitzt einen Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten von $k_f = 10^{-8}$ m/s. Dies entspricht in etwa der Durchlässigkeit eines Lehmbodens. In nicht bindigen Böden verringert das Harz die Permeabilität und verhindert Suffosions- und Erosionserscheinungen.

INJEKTIONSPRINZIP UND –VERFAHREN

Injektionsprinzip

Das gegenständliche Produkt, bzw. Verfahren ist als Injektion mit Baugrundverdrängung (Verdichtungsinjektion, hydraulische Aufbrecheinjektion) zu bezeichnen. Durch die starke Expansionskraft des injizierten Harzes erfolgt eine Verdichtung des umgebenden Bodens im Nahbereich der Injektion.

Injektionsverfahren

Einbringung des Injektionsmittels

Das Injektionsgut wird über Metallrohre in den Boden eingebracht. Dazu erfolgt in einem eigenen Arbeitsgang das Abteufen von Schrägbohrungen mit kleinem Durchmesser bis in die geplante Injektionstiefe. In diese Bohrungen werden Metallrohre mit einem Durchmesser von 20 Millimeter versetzt. Bei der Injektion wird am oberen Rohrende der Injektionskopf mit Pistolengriff aufgesetzt und verschraubt. Am Injektionskopf sind zwei getrennte Leitungen für die beiden Harzkomponenten angeschlossen. Durch Betätigen des Pistolengriffs werden die beiden Komponenten im Injektionskopf vermischt und das Gemisch strömt mit geringem Druck durch die Metallrohre zum Injektionspunkt. Das dort austretende Harzgemisch beginnt zu expandieren.

AUSFÜHRUNG

Die Ausführung der Injektionsarbeiten und aller Nebenarbeiten erfolgt ausschließlich durch Fachpersonal der Firma Uretek.

Bohren

Die Bohrungen werden als kleinkalibrige Schrägbohrungen im Drehbohrverfahren bis ca. 30 bis 50 cm unter Fundamentsohle ausgeführt. Der Bohrraster richtet sich dabei nach den gegebenen Fundamentlasten und –abmessungen. Meist wird in drei Tiefenstufen injiziert.

Aufbereitung des Injektionsgutes

Die beiden Komponenten aus welchen das Injektionsgut gemischt wird sind in getrennten Vorratsbehältern auf einem eigens dafür gebauten LKW gelagert und bedürfen keiner Aufbereitung.

Pumpen und Verteilung

Beiden Komponenten werden in getrennten Leitungen mit geringem Druck zum Injektionskopf gepumpt. Erst beim Betätigen des Pistolengriffs am Injektionskopf erfolgen ein Vermischen beider Komponenten und eine Injektion des Gemisches in den Boden. Eine spezielle Regelung der Pumpgeschwindigkeit ist nicht notwendig, da die Expansion im Injektionspunkt nicht durch den Injektionsdruck, sondern durch die Expansionskraft des Harzgemisches erfolgt.

Injektion / Injektionsablauf

Die Injektion erfolgt über einfache Metallrohre ohne Manschetten, die in temporäre schräge Bohrlöcher eingebracht wurden. Um ein Aufsteigen des Injektionsgutes zu verhindern wird vor Beginn der eigentlichen Injektion eine kleine Menge des Harzgemisches injiziert welcher den Bereich um das Verpressrohr abdichtet.

Nach kurzer Wartezeit beginnt die eigentliche Injektion. Durch Betätigen des Pistolengriffs am Injektionskopf wird das Harzgemisch durch die Metallverrohrung zum Injektionspunkt mit geringem Druck gefördert. Nach Austritt aus der Verrohrung beginnt das Harz zu Expandieren, die entstehende Expansionskraft beträgt dabei bis zu 10.000kPa. Dieser hohe Expansionsdruck wird dabei direkt auf den Boden übertragen und führt bei:

- Rolligen Böden zu einer vollständigen Durchdringung und Ausfüllung der Bodenmatrix, es entsteht ein monolithisches Konglomerat.
- Bindigen Böden zu einer Verdichtung des umgebenden Bodens und zur Bildung von feinen lamellenartigen Strukturen.

Weiters wird die hohe Expansionskraft zur Hebung von Fundamenten verwendet. Durch rasterförmige Injektionen unter Fundamenten kann bei entsprechenden Randbedingungen eine kontrollierte Fundamenthebung bzw. –ausrichtung erreicht werden.

Die Injektionsrohre verbleiben nach Abschluss der Injektion im Boden, sie können jedoch auch herausgezogen werden. Bei Ausführung mehrerer Injektionshorizonte wird zuerst der oberste Horizont injiziert, nach Aushärtung des Harzes erfolgt die Injektion des nächsten.

Bei Hebungsinjektionen sind Nachsetzungen aufgrund der Konsolidation von bindigen Böden oft nicht vermeidbar, diese können jedoch durch weitere Injektionen kompensiert werden.

Bauüberwachung, Prüfung und Kontrolle

Während der Injektionsarbeiten wird für jede Injektionsstelle der Verbrauch an Injektionsgut gemessen und mit dem geplanten Sollverbrauch verglichen. Bei Hebungsinjektionen werden zusätzlich mittels Lasernivellament die Fundamentbewegungen gemessen und die Injektionsmenge darauf abgestimmt.

B) PRÜFUNGEN UND UNTERSUCHUNGEN

An dem Produkt Geoplus® wurden bis dato bereits eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt. In Folge werden diese Untersuchungen und Prüfungen nach der Systematik der in Österreich geltenden ÖNORM B 4454 zusammengefasst. Dabei wird zwischen Grundsatzprüfungen und Güteprüfungen unterschieden. Die Grundsatzprüfung dient dabei zur Feststellung ob das Produkt generell als Injektionsmittel im Boden zur Verbesserung des Untergrundes und zur Hebung von Fundamenten geeignet ist. In der Güteprüfung hingegen wird geprüft ob durch die Injektionsarbeiten die geforderten Injektionsziele erreicht wurden.

GRUNDSATZPRÜFUNGEN

Die in Folge angeführten Untersuchungen erfolgten an der Universität Padua, Abteilung für Geotechnik sowie an der Prüfanstalt IFB Gauer in Deutschland und beschreiben das grundsätzliche Verhalten des Produktes Geoplus®.

Mechanische Eigenschaften des Harzes Geoplus®

- **Einaxiale Druckfestigkeit**

Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit erfolgte an würfelförmigen Prüfkörpern des expandierten und ausgehärteten Harzes. Die Seitenlänge betrug dabei 50 mm, das Volumengewicht wurde zwischen 0,5 kN/m³ und 3,3 kN/m³ variiert. Geprüft wurden jeweils 5 Prüflinge mit gleichem Volumengewicht.

Je nach Volumengewicht lag die ermittelte Druckfestigkeit der Probekörper zwischen 0,2 und 6,0 MPa, siehe Abbildung 1. Diese Werte stellen jedoch nicht die Bruchlast dar, da es im Versuch zu keinem Bruch, sondern zu einer starken horizontalen Verformung der Proben kam. Nach Entlastung stellte sich fast zur Gänze die ursprüngliche Geometrie des Probekörpers wieder ein. Die gemessenen vertikalen Verformungen betrugen zwischen $\epsilon = 3,5\%$ bis $7,0\%$.

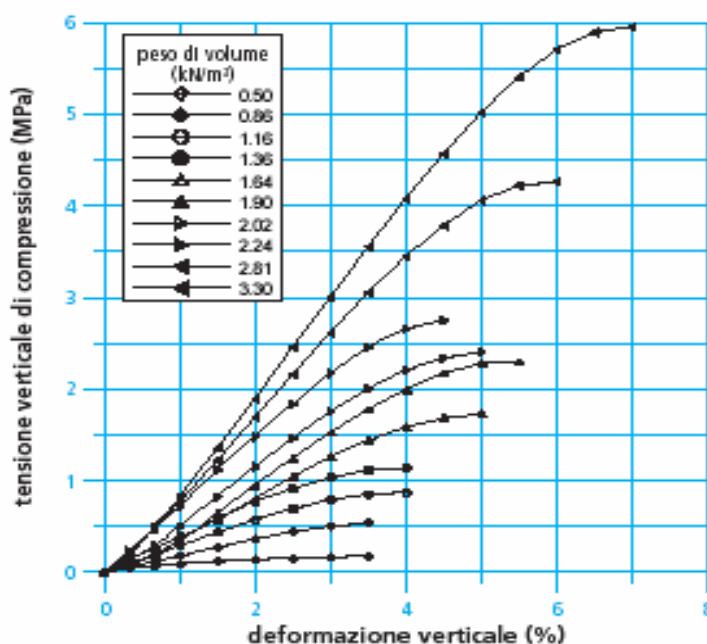


Abbildung 1, Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Die bei hohen Volumengewichten der Probekörper ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten liegen weit über den Werten von natürlichen Böden.

Aus den aufgezeichneten Druck-Stauchungslinien wurde der Elastizitätsmodul bei drei Verformungen (0,33-0,67 und 1,0%) berechnet. Die Ergebnisse liegen zwischen 15 und 85 MPa und liegen somit deutlich über locker gelagerten nicht bindigen, bzw. weich bis steifen bindigen Böden.

- **Einaxiale Zugfestigkeit**

Die Zugfestigkeit besitzt für den Anwendungsbereich des Produktes nur wenig Relevanz, im Gegensatz zu natürlichen Böden besitzt das ausgehärtete Harz eine der Druckfestigkeit gleichwertige Zugfestigkeit. Die Prüfung der Zugfestigkeit erfolgte an Prüfkörpern mit verjüngendem Querschnitt (25mm). Die bei unterschiedlichen Volumengewichten von 0,7 bis 5,0 kN/m³ ermittelten Zugfestigkeiten betrugen zwischen 0,5 und 8,0 MPa.

- **Kraft- Verformungsverhalten**

An der Prüfanstalt IFB Gauer erfolgte die Untersuchung des Kraft- Verformungsverhaltens von Probekörpern mit unterschiedlichen Volumengewichten des expandierten und ausgehärteten Harzes Geoplus®.

In Druck-Setzungsversuchen wurde an Körpern mit Volumengewichten von 1 bis 3 kN/m³ das Verformungsverhalten ermittelt. Dabei konnte der linear-elastische Verformungsbereich von dem plastischen Bereich gut abgegrenzt und daraus so genannte maximal ertragbare Spannungen, unter deren Einwirkung noch keine plastischen Verformungen auftreten, ermittelt werden. Weiters konnten die für den elastischen Bereich geltenden Elastizitätsmodule berechnet werden. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse für drei Volumengewichte dargestellt.

Tabelle 1, Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Dichte	kg/m ³	100	200	300
Maximal ertragbare Spannung	N/mm ²	0,77	2,2	5,3
bei Dehnung	‰	50	40	90
Elastizitätsmodul	N/mm ²	15,4	55,0	58,9

- **Kriechverhalten unter dynamischer Belastung**

Ebenfalls an der Prüfanstalt IFB Gauer wurden Druckschwellversuche zur Ermittlung des Kriechverhaltens von Probekörpern mit unterschiedlichen Volumengewichten unter dynamischer Belastung durchgeführt. Die dynamische Belastung simuliert dabei das Überrollen von mehrachsigen schweren Fahrzeugen. In den Versuchen wurden bei unterschiedlichen Druckamplituden (0,5; 0,7 und 0,9 N/mm²) 20.000 Lastwechsel auf die Probekörper aufgebracht und die Verformung gemessen.

Die Probekörper mit einem geringen Volumengewicht von 100 kg/m³ zeigen erwartungsgemäß die höchsten Verformungen von 0,7 mm bei der höchsten Druckamplitude. Bei einem Volumengewicht von 200 kg/m³ sinkt die Verformung bei dieser Amplitude bereits auf 0,2 mm. Ein Großteil der Verformungen geht dabei auf eine

anfängliche Konsolidierung der Probe zurück, sodass die eigentlichen Kriechverformungen vernachlässigbar sind.

Chemische Eigenschaften- Toxizität

- **Eluatuntersuchungen**

Zur Untersuchung des Auslaugungsverhaltens wurden an Bohrkernproben als auch an Schurfproben des im Boden expandierten und ausgehärteten Harzes Geoplus® Eluatuntersuchungen durchgeführt. Gleichzeitig erfolgte die Untersuchung der Eluierbarkeit des natürlich anstehenden Bodens.

Die Ergebnisse der Eluationsversuche zeigen nur geringe Unterschiede zwischen der Nullprobe (anstehender Boden) und den Harzproben. Gegen den Einsatz des Produktes Geoplus® sind keine grundsätzlichen Bedenken zu erheben.

- **Bestimmung der Ökotoxizität**

Die Bestimmung der Ökotoxizität von Geoplus® erfolgte an Schurfproben des im Boden expandierten und ausgehärteten Harzes. Untersucht wurden dabei die Wachstumshemmung bei Pflanzen, die Toxizität gegenüber Erdwürmern sowie die Bestimmung der Hemmung der Lichtemission von Bakterien (Leuchtbakterien-test).

Die Untersuchungen ergaben, dass eine Einstufung als giftig oder schädlich, was zu einer Kennzeichnung mit R 54 (Giftig für Pflanzen) führen würde, ist nicht angezeigt ist.

EIGNUNGSPRÜFUNG

Die Eignung des Injektionsmittels zur Verbesserung der Tragfähigkeit des anstehenden Untergrundes soll durch großmaßstäbliche Verpressversuche nachgewiesen werden, siehe Teil 2.

TEIL 2: GROßMAßSTÄBLICHE INJEKTIONSVERSUCHE

Allgemeines- Versuchsaufbau

Im Herbst 2009 erfolgten großmaßstäbliche Injektionsversuche mit dem Produkt Geoplus® am Gelände des Austrian Institute of Technology GmbH, AIT.

Ziel der Versuche war es die Wirksamkeit des Injektionsmittels durch konventionelle geotechnische Untersuchungsmethoden nachzuweisen. Der gewählte Untersuchungsumfang umfasste Sondierungen mit der leichten Rammsonde DPL, Messungen der Dichte und des Wassergehaltes mit der Isotopensonde, Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls mit der dynamischen Lastplatte, sowie die Durchführung von Belastungsversuchen mit kreisförmiger Lastplatte (DN 600 mm).

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 natürliches Bodenmaterial wurden dabei ein nichtbindiger, rolliger Boden (Leithaschotter), und zwei bindige Böden (Tegel und Löss) verwendet.

Die Injektionsversuche erfolgten in drei zylindrischen Behältern gefüllt mit den drei natürlichen Böden. In jeden Behälter wurde ein Bodenvolumen von etwa 2,4 m³ eingebaut, die einzelnen Böden wurden für den Nullversuch (nicht injizierter Boden) und den Injektionsversuch unter annähernd gleichen Bedingungen (Einbaudichte und Wassergehalt) in die Behälter eingebaut.

Im Zuge der Belastungsversuche wurde abwechselnd an jedem Behälter ein Belastungswiderlager in Form von zwei Stahl I-Träger, die mittels Stabstählen miteinander verschraubt wurden, aufgebaut. Die Belastung des eingebauten Bodenmaterials erfolgte durch eine große Lastplatte mit 60 cm Durchmesser mit zugehörigem hydraulischem Druckzylinder und Presse. Die Setzung der Platte wurde mit Hilfe von vier Messuhren registriert. In Abbildung 2 ist der gesamte Versuchsaufbau dargestellt, Abbildung 3 und 4 zeigen Details dazu.

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).

Zielsetzung der Versuche:

- Ermittlung der grundlegenden geotechnischen Parameter von injizierten mineralischen Böden mit Hilfe konventioneller Untersuchungsmethoden (Sondierungen, Dichtebestimmung)
- Untersuchung des Zeit-Setzungsverhaltens bei unterschiedlichen Belastungen.
- Vergleich des Verformungsverhaltens von injizierten und nicht injizierten Böden bei definierten Randbedingungen und gleichem Belastungsverlauf.
- Ermittlung und Vergleich des Verformungs-Moduls (E_v) von injizierten und nicht injizierten Böden.

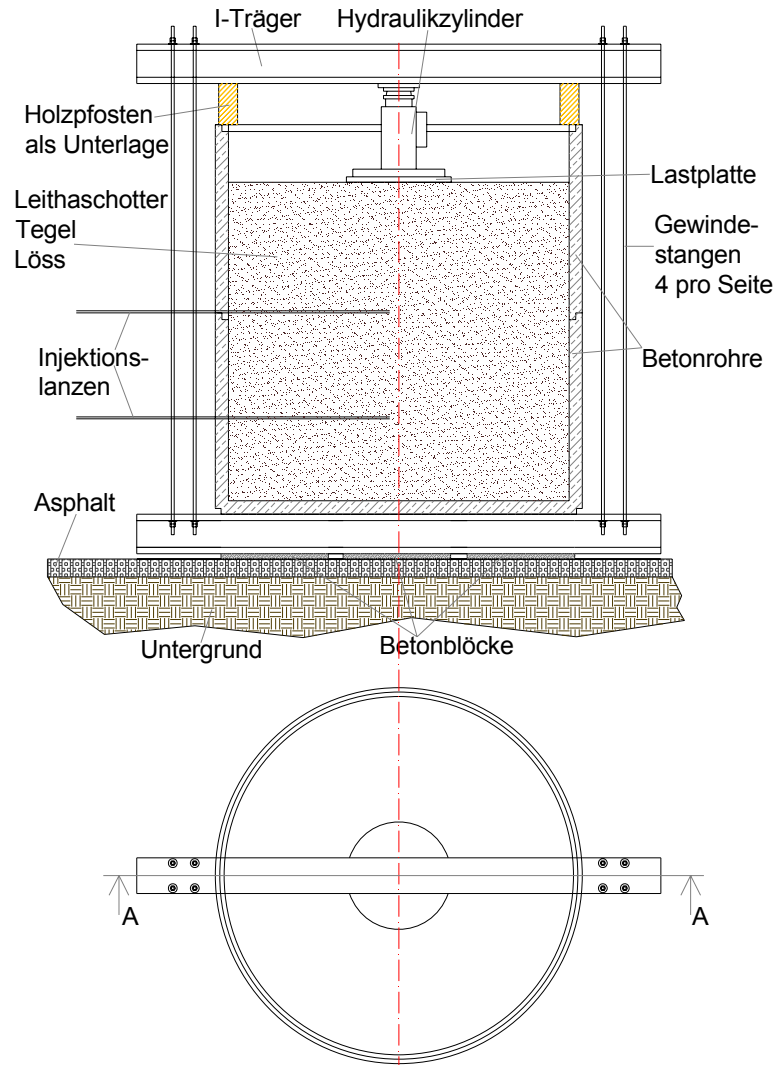


Abbildung 2, Versuchsaufbau Belastungsversuche



Abbildung 3 Belastungszyylinder mit Widerlager



Abbildung 4, Belastungszyylinder und Lastplatte mit Messuhren

Ergebnisse und Schlussfolgerungen der geotechnischen Untersuchungen

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

Nicht bindiger, rolliger Boden - Leithaschotter:

- Belastungsversuche

Der injizierte Leithaschotter, in den folgenden Diagrammen als Geoplus® bezeichnet, konnte bis geplanten Maximum von 500 kN/m² belastet werden. Beim nicht injizierten Boden (Nullboden) musste der Versuch aufgrund der hohen Setzungen bei 400 kN/m² beendet werden. Das Kraft-Setzungsdiagramm in Abbildung 5 zeigt sehr deutlich die wesentlich geringeren Setzungen des injizierten Bodens im Gegensatz zum Nullboden. Besonders die Belastungsstufen bis 200 kN/m² zeigen geringe Setzungen, der Nullboden weist hier etwa die 10 fachen Werte auf.

Die Entlastungsschleife bei 300 kN/m² zeigt bei beiden einen sehr flachen Verlauf, d.h. es handelt sich um plastische Verformungen des gesamten Korngerüsts. Ein elastisches Zusammendrücken und Entspannen des expandierten Harzes erscheint nicht gegeben.

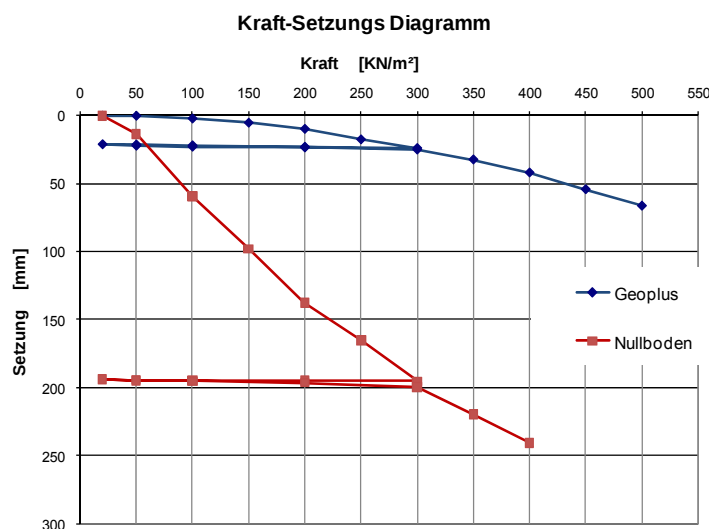


Abbildung 5, Last- Setzungsdiagramm injizierter und nichtinjizierter Leithaschotter

- Rammsondierungen

Nach den Belastungsversuchen wurden direkt unter der Belastungsplatte leichte Rammsondierungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche an dem injizierten Boden (Geoplus®) sowie dem Nullboden sind in Abbildung 6 dargestellt. Die ersten 30 cm zeigt sich kein wesentlicher Unterschied, da beide Böden durch die Belastung entsprechend verdichtet wurden. Erst darunter zeigt die Sondierung im injizierten Boden deutlich höhere Schlagzahlen je 10 cm Eindringung. Bei 0,9 m Tiefe traf die Sondierspitze im injizierten Boden auf

einen Stein, sodass die Sondierung abgebrochen werden musste.

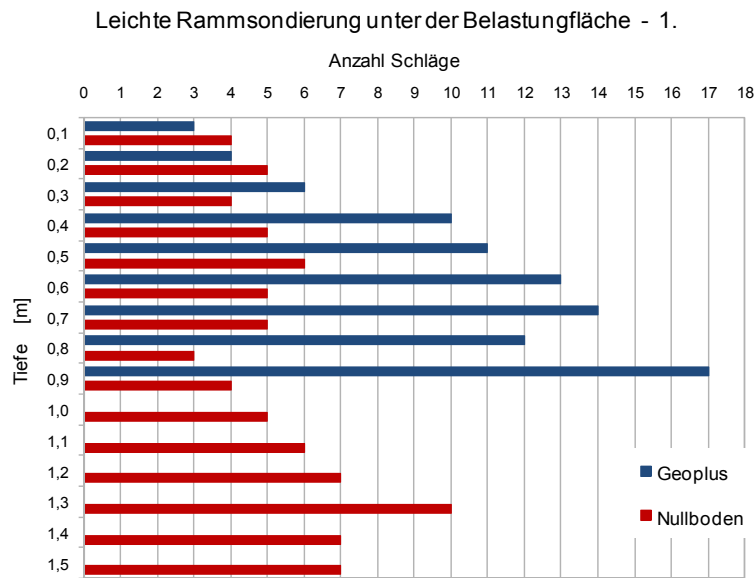


Abbildung 6, Auswertung der leichten Rammsondierung im Leithaschotter

- Dynamischer Lastplattenversuch

Mit dem dynamischen Fallgewichtsgesetz wurden ebenfalls nach dem Belastungsversuch im Bereich unter der Belastungsplatte sowie an drei im Umkreis von ca. 1 m entfernten Punkten Messungen des dynamischen Verformungsmoduls durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der Messpunkt 1 liegt dabei im Bereich des durch die Belastungsversuche verdichteten Bodens, die drei weiteren Messpunkte im Umkreis dazu. Die E_{vd} Werte des injizierten Bodens liegt gering über den des Nullbodens.

Tabelle 2, Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche

Messpunkt	Geoplus®	Nullboden
	E _{vd} (MN/m ²)	E _{vd} (MN/m ²)
1	17,36	15,62
2	12,59	8,67
3	14,97	12,80
4	10,94	11,58

- Visuelle Beurteilung des Injektionsbereiches

Um einen bestmöglichen Einblick in die Ausbreitung und in das Verhalten des Injektionsgutes im Boden zu erhalten, wurde die Injektionsbereich nach Abschluss der Versuche freigelegt. Da die Betonringe einen Durchmesser von zwei Meter haben, waren die Grabungen mit einem Löffelbagger sehr schwierig. Auch mit der kleinsten Schaufel war es nur begrenzt möglich zu graben. Daher musste sehr viel händisch gegraben werden.

Beim körnigen Leithaschotter wurden die leeren Hohlräume vom Gemisch durchdrungen und produzierten ein monolithisches Konglomerat von sehr guten mechanischen Eigenschaften siehe Abbildung 7. Die Ausbreitung des Schaums war sehr großflächig und gleichmäßig, Abbildung 9. Es entstand eine sehr gute Vermischung mit dem Schotter. Direkt an der Injektionsstelle, in der Mitte des Rohres, bildete sich sehr viel Schaum mit sehr hoher Festigkeit Abbildung 8. An der Oberfläche war kein Austritt zu beobachten.



Abbildung 7, Gemisch aus Schotter und Geoplus®



Abbildung 8, Bereich der Injektionsstelle



Abbildung 9, Ausbreitung des Harzes im Schotter

Bindiger Boden – Tegel

- Belastungsversuche

Der injizierte Tegel, in den folgenden Diagrammen als Geoplus® bezeichnet, konnte bis zum geplanten Maximum von 400 kN/m² belastet werden, siehe Abbildung 10. Beim nicht injizierten Boden (Nullboden) musste der Versuch aufgrund der hohen Setzungen bei 200 kN/m² beendet werden, Abbildung 10. Das für den Nullboden dargestellte Kraft- Setzungsdiagramm ist als Bruchzustand zu verstehen. Die Auswirkung der Injektion auf das Setzungsverhalten unter Belastung als hervorragend bezeichnet werden. Die Setzungen bei den Laststufen bis 200 kN/m² können um etwa den Faktor 10 verringert werden. Die weiteren Laststufen zeigen zwar eine etwas stärkere Zunahme der Setzungen, es ist jedoch weit noch kein Bruchzustand des Bodens erkennbar.

Die Entlastungsschleife bei 300 kN/m² zeigt beim injizierten Boden einen sehr flachen Verlauf, d.h. es handelt sich um plastische Verformungen des gesamten Korngerüsts. Ein elastisches Zusammendrücken und Entspannen des expandierten Harzes erscheint nicht gegeben.

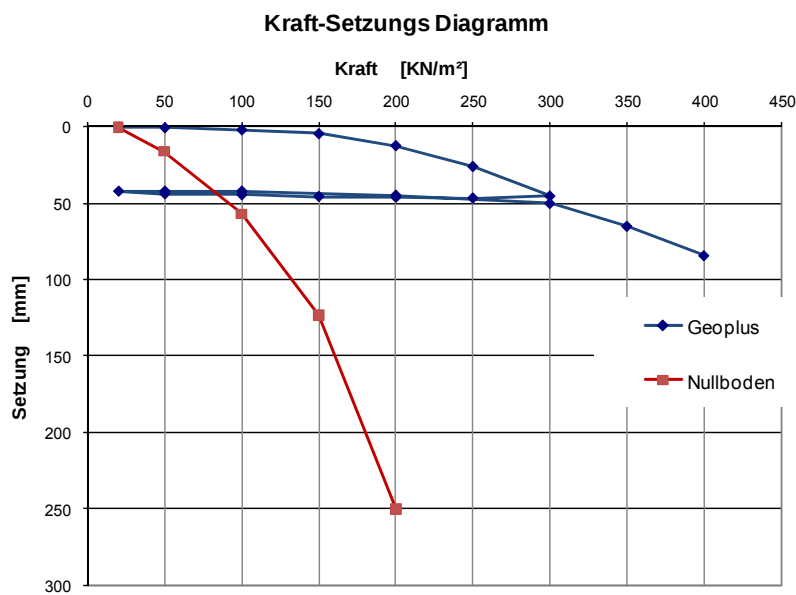


Abbildung 10, Last- Setzungsdiagramm Tegel

- Rammsondierungen

Nach den Belastungsversuchen wurden direkt unter der Belastungsplatte leichte Rammsondierungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche an dem injizierten Boden (Geoplus®) sowie dem Nullboden sind in Abbildung 11 dargestellt. Deutlich zeigen sich hier die höheren Schlagzahlen im injizierten Boden. Besonders im Bereich von 0,0 bis 0,9 m zeigt der injizierte Boden in etwa die doppelte Schlagzahl je 10 cm Eindringung.

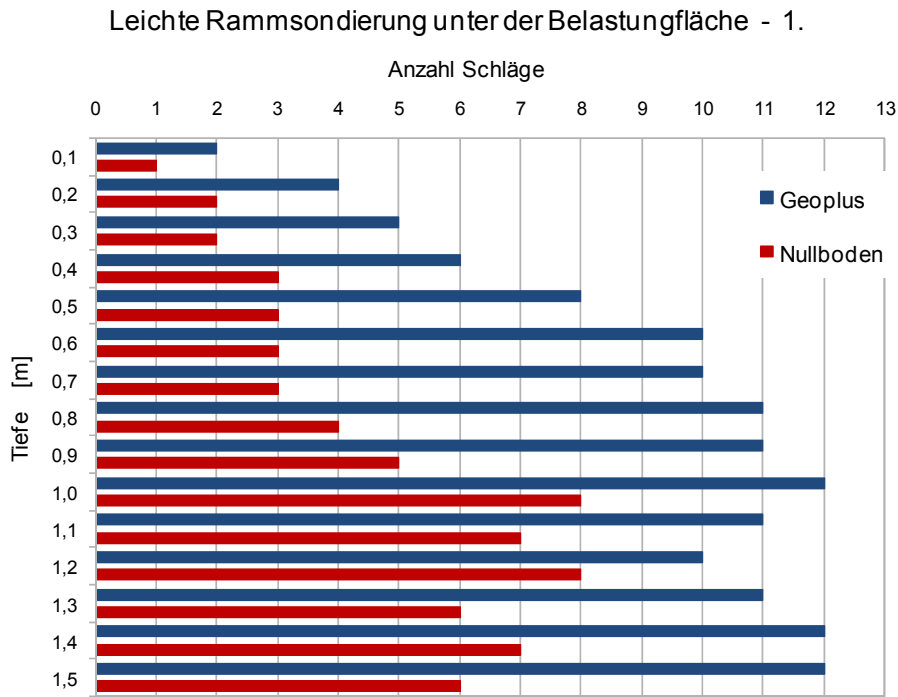


Abbildung 11, Auswertung der leichten Rammsondierung im Tegel

- Dynamischer Lastplattenversuch

Mit dem dynamischen Fallgewichtsgerät wurden ebenfalls nach dem Belastungsversuch im Bereich unter der Belastungsplatte sowie an drei im Umkreis von ca. 1 m entfernten Punkten Messungen des dynamischen Verformungsmoduls durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Der Messpunkt 1 liegt dabei im Bereich des durch die Belastungsversuche verdichteten Bodens, die drei weiteren Messpunkte im Umkreis dazu. Die E_{vd} Werte des injizierten Bodens liegt sehr deutlich über denen des Nullbodens. Der Messpunkt direkt unter der Belastung zeigt erwartungsgemäß bei beiden Böden den höchsten E_{vd} –Wert, im injizierten Boden ist dieser jedoch um den Faktor 3 höher. In Verbindung mit den Ergebnissen der Rammsondierung zeigt dies die bodenverbessernde Wirkung auch im obersten Bereich bis ca. 1 m unter der Oberfläche.

Tabelle 3, Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche am Tegel

	Geoplus®	Nullboden
	E_{vd} (MN/m ²)	E_{vd} (MN/m ²)
1	14,67	4,75
2	11,13	3,60
3	9,98	3,70
4	11,50	3,50

- Visuelle Beurteilung des Injektionsbereiches

Beim Tegel bildete die Injektionsmittel ein engmaschiges, lamellenförmiges Netz im Boden. 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. Abbildungen 12 bis 14 zeigt diese Lammellenstruktur. An der Oberfläche waren keine Austritte von Injektionsgut zu beobachten.

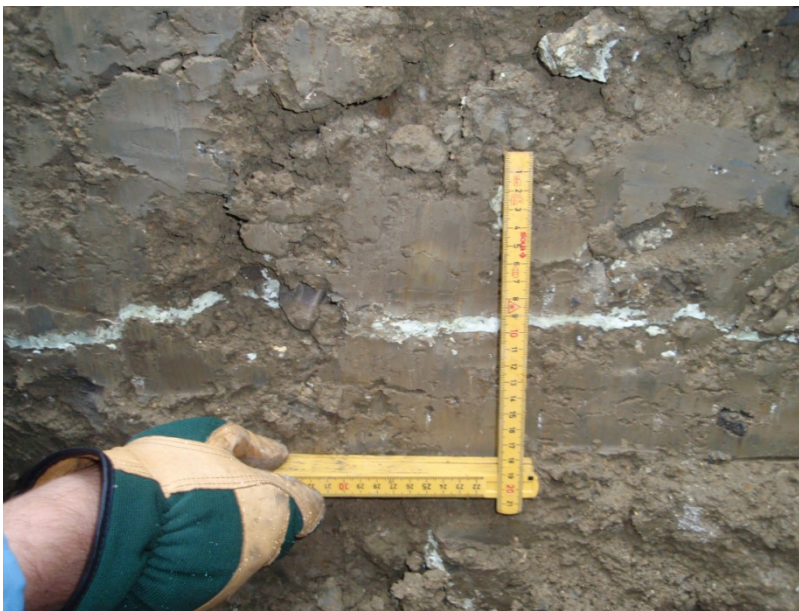


Abbildung 12, Ausbreitung des Injektionsgutes im Tegel



Abbildung 13, Ausbreitung des Injektionsgutes im Tegel

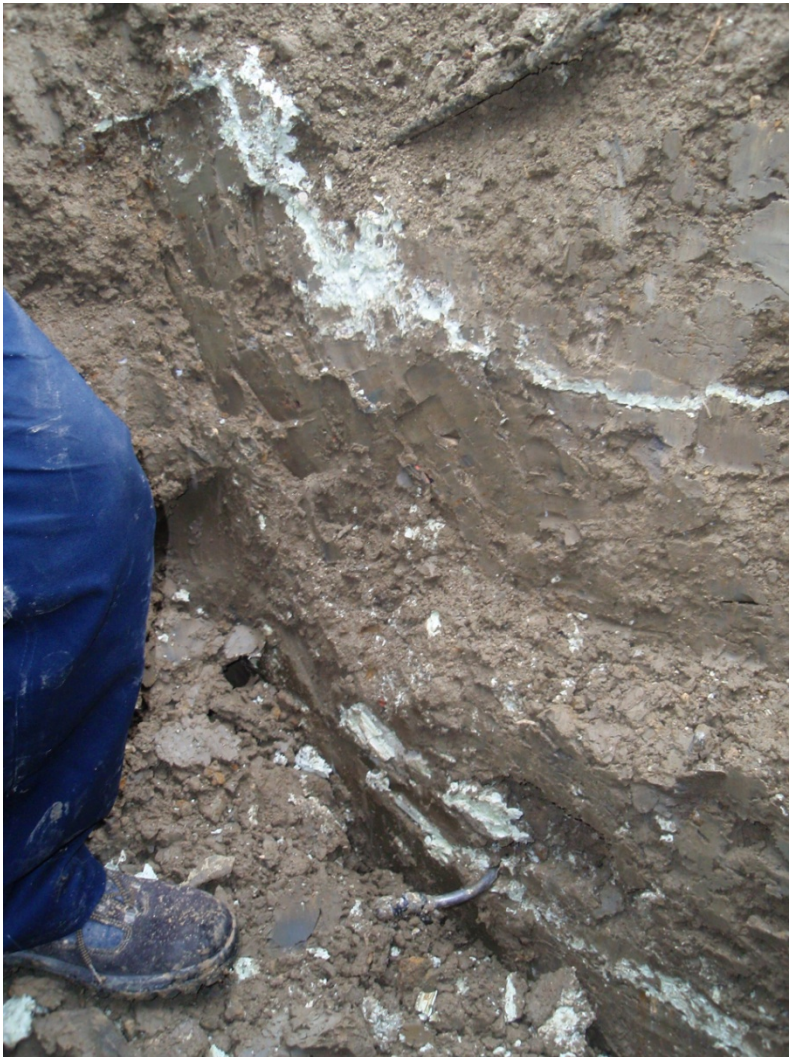


Abbildung 14, Ausbreitung des Injektionsgutes im Tegel

Bindiger Boden – Löss

- Belastungsversuche

Der injizierte Löss, in den folgenden Diagrammen als Geoplus® bezeichnet, konnte nicht bis zum geplanten Maximum von 400 kN/m² belastet werden. Aufgrund der hohen Setzungen musste der Belastungsversuch bei 200 kN/m² abgebrochen werden, Abbildung 15. Beim nicht injizierten Boden (Nullboden) traten bereits in der ersten Laststufe sehr hohe Setzungen auf. Der Nullboden kann daher als nicht tragfähig eingestuft werden. Die Auswirkung der Injektion auf das Setzungsverhalten unter Belastung ist jedoch als sehr gut zu bezeichnen. Die Setzungen bei den Laststufen bis 100 kN/m² können um 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.

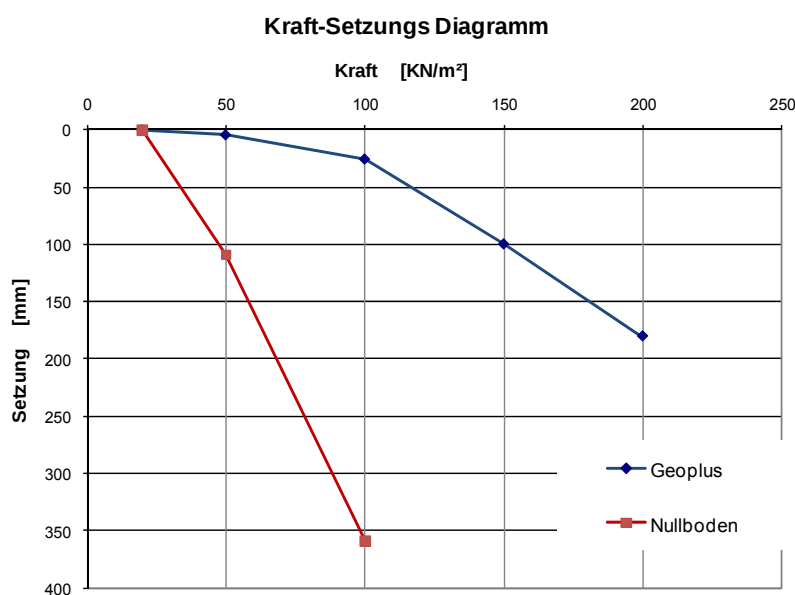


Abbildung 15, Last- Setzungsdiagramm Löss

- Rammsondierungen

Nach den Belastungsversuchen wurden direkt unter der Belastungsplatte leichte Rammsondierungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche an dem injizierten Boden (Geoplus®) sowie dem Nullboden sind in Abbildung 16 dargestellt. Deutlich zeigen sich hier die höheren Schlagzahlen im injizierten Boden. Bis in 0,5 m Tiefe ist die aufgrund der Belastungsversuche aufgetreten Verdichtung bei beiden Böden erkennbar. Darunter zeigt der Nullboden eine sehr lockere Lagerung, der injizierte Boden hingegen weist die dreifache bis vierfache Schlaganzahl je 10 cm Eindringung auf.

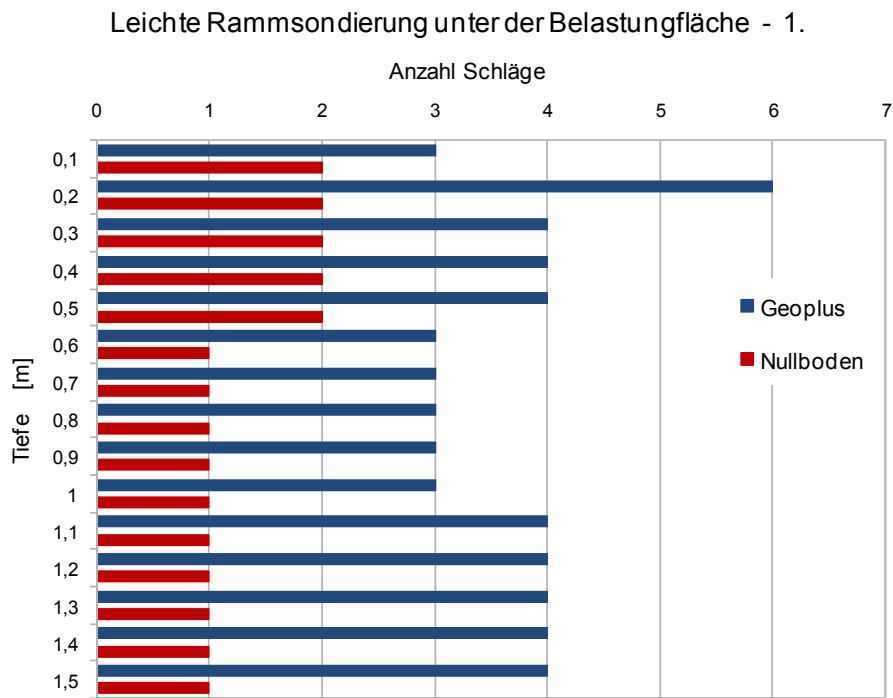


Abbildung 16, Auswertung der leichten Rammsondierung im Löss

- Dynamischer Lastplattenversuch

Mit dem dynamischen Fallgewichtsgerät wurden ebenfalls nach dem Belastungsversuch im Bereich unter der Belastungsplatte sowie an drei im Umkreis von ca. 1 m entfernten Punkten Messungen des dynamischen Verformungsmoduls durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Der Messpunkt 1 liegt dabei im Bereich des durch die Belastungsversuche verdichteten Bodens, die drei weiteren Messpunkte im Umkreis dazu. Die E_{vd} Werte des injizierten Bodens liegt gering über den des Nullbodens.

Tabelle 4, Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche am Löss

	Geoplus®	Nullboden
	E_{vd} (MN/m ²)	E_{vd} (MN/m ²)
1	13,35	13,31
2	6,45	4,52
3	5,77	5,04
4	6,10	5,08

- Visuelle Beurteilung des Injektionsbereiches

Aufgrund der sehr lockeren Lagerung des Lössbodens bildete das Harz beim Austritt aus dem Injektionsrohr eine Blase, siehe Abbildung 17. Im Zuge der weiteren Expansion des Harzes formten sich starke zur Oberfläche orientierte Lamellen. In weiterer Folge trat Injektionsgut an der Oberfläche aus. Aufgrund der hohen Expansionskraft konnte das Harz den lockeren Boden verdrängen, und aufgrund der geringeren Dichte steigt es nach oben. Deutlich ist dies in Abbildung 18 und 19 zu erkennen.



Abbildung 17, Ausbreitung des Injektionsgutes im Bereich der Injektionsstelle



Abbildung 18, Ausbreitung des Injektionsgutes im Bereich der Injektionsstelle

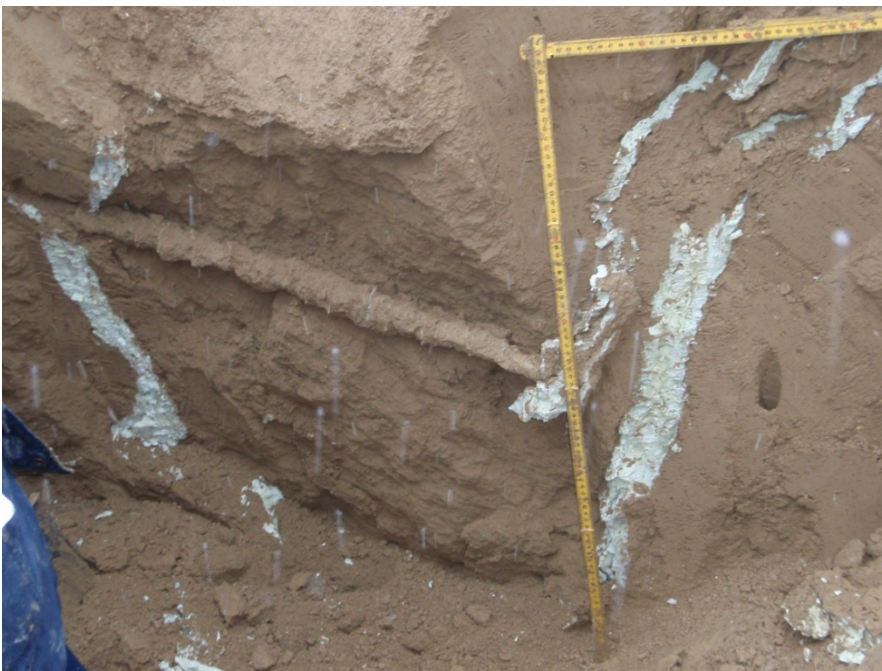


Abbildung 19, Ausbreitung des Injektionsgutes im Bereich der Injektionsstelle

Zusammenfassung und Interpretation der großmaßstäblichen Injektionsversuche

Ziel der Versuche war es, die positive Auswirkung des Injektionsmittels Geoplus® auf die Tragfähigkeit von unterschiedlichen natürlichen Böden mit konventionellen geotechnische Untersuchungsmethoden nachzuweisen. Der gewählte Untersuchungsumfang umfasste Sondierungen mit der leichten Rammsonde DPL, Messungen der Dichte und des Wassergehaltes mit Isotopensonde, Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls mit der dynamischen Lastplatte, sowie die Durchführung von Belastungsversuchen mit kreisförmiger Lastplatte (DN 600 mm).

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 des expandierten und ausgehärteten Injektionsmittels Geoplus® 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 deutlich flacher geneigt. Die Entlastungsschleife zeigt einen annähernd waagrechten Verlauf, es handelt sich daher 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.
- Bei den untersuchten bindigen Böden (Tegel, Löss) konnten durch die Injektion ebenfalls die Setzungen aufgrund der Versuchsbelastung sehr deutlich reduziert werden. Darüber hinaus wird jedoch auch die Tragfähigkeit deutlich verbessert. Sehr deutlich erkennbar 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 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 untersuchte Lössboden stellte aufgrund der sehr lockeren Lagerung einen Sonderfall dar. Beim nicht injizierten Boden ist bereits bei den ersten Laststufen die Grenztragfähigkeit erreicht. Mit Injektion kann jedoch eine Belastung bis 100 kN/m^2 bei noch vertretbaren Setzungen aufgebracht werden, was eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit bei gleichzeitiger starker Reduktion der auftretenden Setzungen bedeutet.