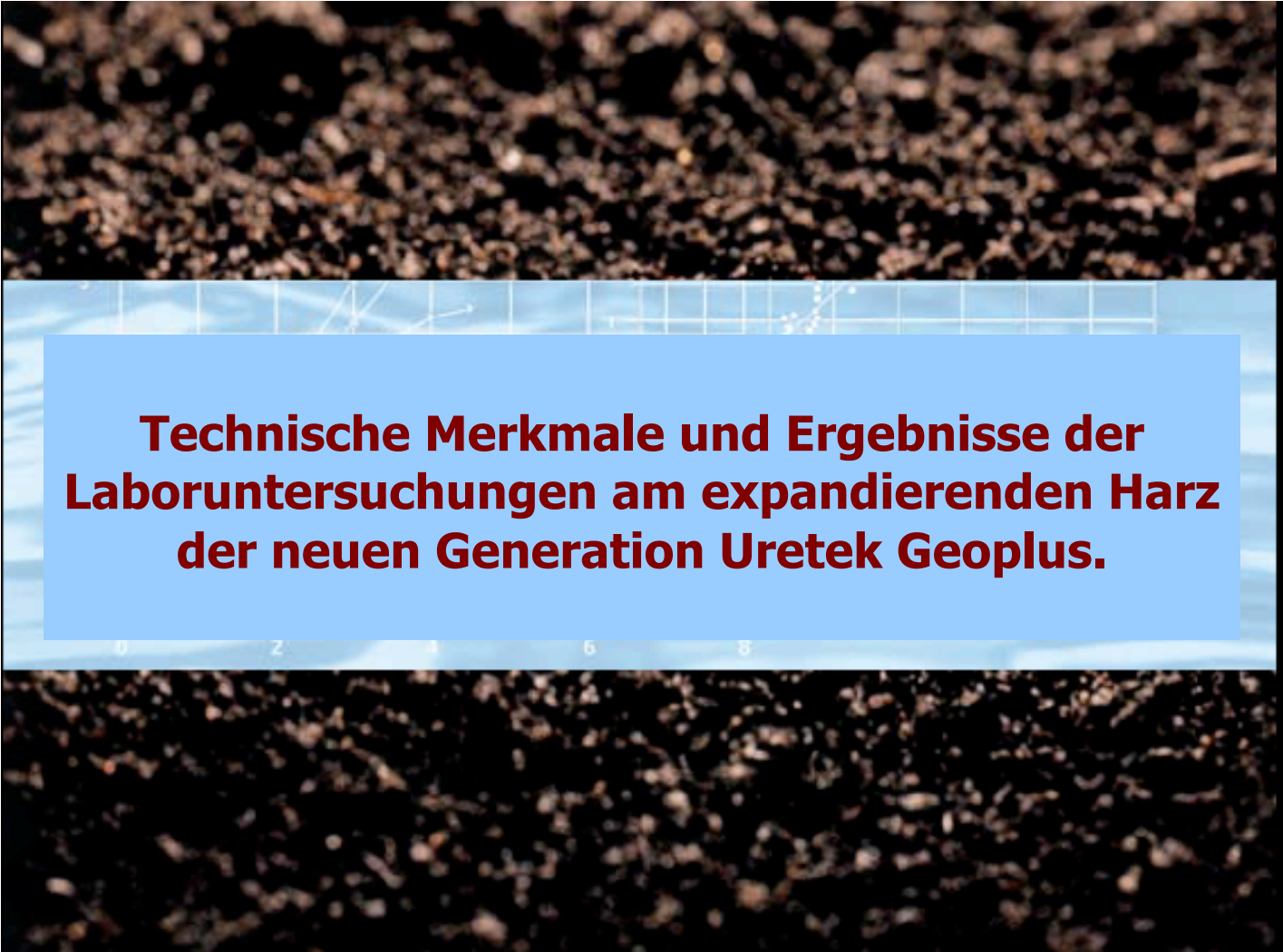


URETEK GEOPLUS®

Das superkonsolidierende Harz zu 10.000 kPa



**Technische Merkmale und Ergebnisse der
Laboruntersuchungen am expandierenden Harz
der neuen Generation Uretek Geoplus.**

Erstellt vom technischen Team Uretek
in Zusammenarbeit mit der Abteilung IMAGE
der Universität Padua.

Aus dem Italienischen übersetzt.

Inhaltsverzeichnis:

1. Einführung

2. Erster Teil (erstellt vom technischen Team Uretek)

- a. Die Technologie Uretek Deep Injections
- b. Expansionskraft
- c. Reaktionszeit
- d. Expansionsgrad
- e. Elastizitätsmodul
- f. Belastungswiderstand
- g. Alterungsbeständigkeit
- h. Dissipationskoeffizient
- i. Volumengewicht
- j. Reaktionsstabilität

3. Zweiter Teil (Ergebnisse und Interpretation der Versuche am Harz Uretek Geoplus, erstellt von der Abteilung IMAGE der Universität Padua)

- a. Vorwort
- b. Vertikale Druckversuche mit seitlich freier Expansion
- c. Zugversuche
- d. Expansionsversuche unter Dehnung
- e. Biegeversuche
- f. Schlussbemerkungen

1. Einführung

Seit einigen Jahren ist nun schon zu beobachten, wie sich Uretek Deep Injections in der Geotechnik als Konsolidierungsmethode für Fundamentböden durchgesetzt hat. Anfänglich brachten die europäischen Techniker der von Uretek erfundenen und patentierten Methode ein gewisses Misstrauen entgegen, weil sie sie als unzureichend getestet erachteten.

Heute - im Abstand von mehreren Jahren - erfährt sie eine enorme Zustimmung, die auf den zahlreichen, im In- und Ausland von Uretek mit Erfolg durchgeführten Eingriffen beruht.

Zur Beibehaltung seiner technologischen Vorrangstellung hat Uretek mit Unterstützung der Universität Padua eine Reihe von Studien und Forschungen unternommen, um sowohl die Eingriffstechnik als auch die verwendeten Produkte zu verbessern. Der Erfolg ließ nicht auf sich warten, denn das Ergebnis war eine wesentliche Verbesserung der angewandten Methodologie.

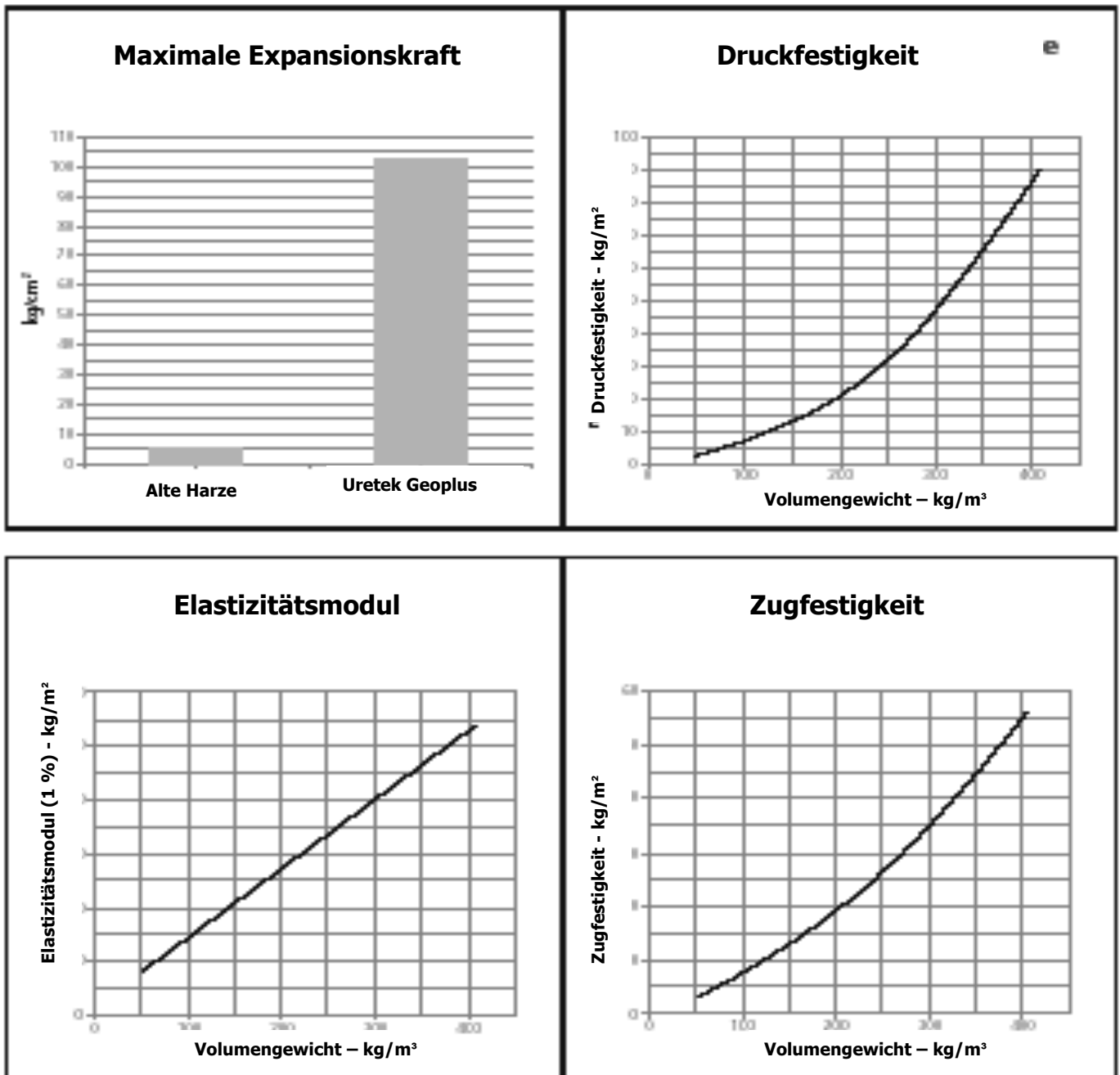
Die bedeutendste Innovation betrifft jedoch das verwendete Harz: Uretek kann heute Uretek **GEOPLUS®** präsentieren, das eigens für die Tiefeninjektion entwickelt und ausschließlich für Uretek hergestellt wurde.

Auf den folgenden Seiten wird das Harz Uretek **GEOPLUS®** ausführlich analysiert.

Im ersten Teil, der vom technischen Team Uretek erarbeitet wurde, sind die Hauptmerkmale des Verfahrens Uretek Deep Injections und des Harzes Uretek **GEOPLUS®** in Bezug auf die gängigsten Anwendungen zusammengefasst.

Der zweite Teil beinhaltet den Bericht der Universität Padua mit den Anmerkungen von Prof. Ing. Giuseppe Ricceri und Prof. Ing. Marco Favaretti der Abteilung für Geotechnik (IMAGE) der Universität Padua sowie eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Versuche am Harz Uretek **GEOPLUS®**.

**Übersichtstabelle der wesentlichen Eigenschaften
des expandierenden Harzes URETEK GEOPLUS.**



Die Ergebnisse der Tabelle sind im Bericht des Prof. Ing. Giuseppe Ricceri und Prof. Ing. Marco Favaretti der Universität Padua ausgewertet und ausführlich kommentiert (ab Seite 9).

Die Tabelle bezieht sich auf Tests, die spezifisch am Harz Uretek Geoplus durchgeführt wurden; die Resultate sind nicht auf andere Harze anzuwenden, weil sich sehr bedeutende Abweichungen ergeben könnten.

Die vollständigen Bescheinigungen der Universität Padua zu den besagten Tests werden bei Bedarf zur Verfügung gestellt.

2. Erster Teil

a. Die Technologie Uretek Deep Injections

Das Harz Uretek **GEOPLUS®** wird im flüssigen Zustand durch die mechanische Wirkung einer Pumpe in Leitungen injiziert, bis es im zu konsolidierenden Boden austritt.

Die Leitungen werden in Bohrungen von unter 20mm Durchmesser eingeführt, welche direkt im Fundament angebracht sind, sodass das darunter liegende Bodenvolumen mit Präzision bearbeitet werden kann.

Der Einspritzdruck ist nicht hoch und beeinflusst auch nicht das Gelingen des Eingriffes, da der zu erreichende Kompaktheitsgrad des Bodens von der Expansionskraft des Harzes, nicht vom Injektionsdruck abhängt.

Bei der Injektion entwickelt das Gemisch eine chemische, exotherme Reaktion, die eine Änderung vom flüssigen zum festen Zustand bewirkt. Die daraus folgende Volumenzunahme hängt mit der Entwicklung einer Expansionskraft zusammen.

Der Widerstand, auf den das Harz in der Expansionsphase trifft, bewirkt umgekehrt proportional eine Volumenzunahme, direkt proportional hingegen eine Expansionskraft.

Die chemische Reaktion läuft sehr schnell ab; das daraus resultierende feste Gemisch zeigt von Anfang an seine endgültigen physisch-mechanischen Eigenschaften.

Die Reaktion, die vom umliegenden Boden begrenzt wird, überträgt die Energie direkt auf dessen Struktur und wirkt sich verdichtend und - wo möglich - aggregierend aus.

Tatsächlich verhält sich das Gemisch Uretek **GEOPLUS®** nach seiner Injizierung in den Boden unterschiedlich entsprechend der vorgefundenen Beschaffenheit:

➔ bei körnigem Boden durchdringt das Gemisch die leeren Hohlräume und produziert als hydraulisches Bindemittel ein monolithisches Konglomerat von beachtlichen mechanischen Eigenschaften:

➔ bei bindigem Boden durchdringt das Gemisch die leeren Hohlräume nicht, sondern bildet ein engmaschiges, lamellenförmiges Netz, ähnlich dem Wurzelgebilde einer Pflanze, und produziert eine durch die Lamellenstruktur komprimierte und verstärkte Anhäufung.

In beiden Fällen wirkt sich das Harz durch die chemische Reaktion auf den aufnehmenden Boden stark verdichtend aus.

In der Folge werden die für einen erfolgreichen Eingriff ausschlaggebenden Eigenschaften des Harzes Uretek **GEOPLUS®** zusammengefasst.

b. Expansionskraft

Die maximale Expansionskraft des Gemisches Uretek **GEOPLUS®** beträgt unter Dehnung 10.000 kPa. Diese Eigenschaft ist ausschlaggebend für das Gelingen der Behandlung Uretek Deep Injections. Die chemische Reaktion des Harzes Uretek **GEOPLUS®** bewirkt im Boden eine Vorverdichtung, die zu einer Verringerung der Hohlräume führt. Diese treibende Wirkung greift möglichen Senkungen vor, indem sie sie ausgleicht.

Die durch die chemische Reaktion erzeugte Expansionskraft nimmt mit der Zunahme des Expansionsgrades des Harzes selbst ab. Dies bedeutet, dass sich der Expansionsgrad in Abhängigkeit der Begrenzung selbst reguliert. Um den Prozess zu vereinfachen, könnte man sich das System Boden-Harz Uretek **GEOPLUS®** schematisch als zwei gegeneinander wirkende Federn vorstellen: die Feder 'Geoplus' und die Feder 'Boden'.

Am Ausgang der Injektionsleitung ist die Feder 'Geoplus' vollständig zusammengezogen. Es beginnt die Expansion; das System ist dann ausbalanciert, wenn die Feder 'Geoplus' einen Expansionsgrad erreicht, dessen erzeugte Kraft gleich der Reaktion ist, welche der verdichtete Boden entgegensetzt. Das System befindet sich alsdann im Gleichgewicht und wird durch die Veränderung des Gemisches, das fest wird, gesichert. Der vom festen Harz entgegengesetzte Widerstand ist höher als die Reaktion des verdichteten Bodens, wodurch das System zeitlich stabil bleibt.

Das Verfahren wird innerhalb einer sehr kurzen Zeit durchgeführt und gezielt eingesetzt. Die beiden genannten Eigenschaften deuten auf eine dynamische Wirkung hin, die zu äußerst niedrigen Spaltüberdrücken führt und eine sehr rasche Dissipation fördert.

c. Reaktionszeit

Die chemische Reaktion, die zur Expansion des Harzes und zu dessen Veränderung vom flüssigen zum festen Zustand führt, spielt sich sehr schnell ab. Dies ist mit einer Reihe von Vorteilen verbunden:

- ➔ Eingrenzung des Harzes im Bereich von max. 2,00 m um den Injektionspunkt.
Durch diese Eigenschaft kommt es zur:
 - vollständigen Verwendung des Injektionsmaterials ohne Verschwendung;
 - Möglichkeit, Schäden aufgrund von nicht kontrolliertem Einsickern von Material im umliegenden Bereich zu vermeiden;
 - präzisen Lokalisierung des behandelten Bodenvolumens.
- ➔ Übertragung der chemischen Reaktionsenergie auf den Boden mittels 'dynamischer' Wirkung. Diese Eigenschaft lässt eine Ähnlichkeit mit der dynamischen Verdichtungswirkung durch mechanische Fahrzeuge auf Straßen- und Bahndämme vermuten.

⇒ sehr kurze Bearbeitungszeiten mit rund 10 m Fundament pro Tag für jede Eingriffsmannschaft, wenn die Behandlung eines Bodens bis zu einer Tiefe von 3 m ab Auflagefläche des Fundaments angenommen wird. Der Einsatz mehrerer Mannschaften verkürzt natürlich die Eingriffszeiten.

⇒ sofortige Erkennung des Eingriffsergebnisses. Die Injektion des Harzes wird mit Lasergeräten, die an der darüber liegenden Struktur angebracht sind, überwacht und solange fortgesetzt, bis ein Anheben der Struktur selbst festgestellt wird: dies bedeutet, dass der Fundamentboden einen Verdichtungsgrad erreicht hat, der ihn nicht nur den von der Struktur erzeugten, statischen Spannungen gegenüber widerstandsfähig macht, sondern auch den viel höheren dynamischen Spannungen gegenüber, die sich bei der Anhebung entwickeln.

Die Expansionsgeschwindigkeit des Harzes und seine definitive Stabilisierung in fester Form ermöglichen es, mit geotechnischen Versuchen vor Ort den erfolgreichen Ausgang des Eingriffes zu überprüfen.

⇒ Kontrollierbarkeit des Verfahrens anhand von an der Struktur angebrachten Lasergeräten, um die Bewegungen zu erfassen und die Sicherheit des Eingriffes zu gewährleisten.

d. Expansionsgrad

Der Expansionsgrad des Gemisches Uretek **GEOPLUS®** verändert sich zwischen 2 und 20mal in Abhängigkeit des vorgefundenen Widerstandes; 1 dm³ Gemisch kann folglich eine feste Verbindung mit einem variablen Volumen von 2 bis 20 dm³ erzeugen. Diese Eigenschaft erlaubt:

⇒ die Verfüllung möglicher, im Fundamentboden oder an der Schnittstelle zwischen Boden und Bettungsebene vorhandener Hohlräume;

⇒ die sofortige Kompensierung des vom Boden eingebüßten Volumens, das durch die Expansion des Harzes verdichtet wurde.

e. Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul des Gemisches Uretek **GEOPLUS®** ist mit jenem eines Fundamentbodens vergleichbar und variiert zwischen 10 und 80 MPa je nach erreichter Dichte.

Der geotechnischen Fachliteratur zufolge verteilt sich eine durch ein Fundament übertragene Belastung des Bodens in der Tiefe und nimmt dabei an Intensität ab und an Härteindruck zu.

Die Theorie von Bussinesq lehrt, wie solche Änderungen von Spannungszuständen in einer allgemeinen Tiefe 'z' zu berechnen sind.

Bei tiefen Beton- oder Stahlfundamenten, die sich härter als der aufnehmende Boden erweisen, werden die Spannungen größtenteils in die Tiefe übertragen.

Ein mit dem Harz Uretek **GEOPLUS®** behandelte Boden verändert seine Härteeigenschaften nicht; somit ändert sich beim Eingriff auch nicht die Kraftverteilung in den tieferen Schichten.

Auch wenn das behandelte Volumen nicht mit dem gesamten, von der Lastenverteilung betroffenen Volumen übereinstimmt, sondern nur mit dem Bereich, der den Spannungen am stärksten ausgesetzt ist, sind die darunter liegenden Bodenschichten, die vor dem Uretek-Eingriff den Oberflächenbelastungen nur begrenzt ausgesetzt waren, auch nach dem Eingriff gleichermaßen davon betroffen.

Es genügt also, das Bussinesq-Volumen zu bearbeiten, das am stärksten den Gebäudelastspannungen ausgesetzt war und ist.

Da im Boden keine Neuverteilung der Spannungen erfolgt, kann das Verfahren Uretek Deep Injections auch für partielle oder lokale Eingriffe empfohlen werden.

f. Belastungswiderstand

Die mechanischen Eigenschaften des Gemisches Uretek **GEOPLUS®** wurden in den Labors der Universität Padua erforscht. In der Folge wird der beschreibende Bericht der Leiter der Untersuchungen wiedergegeben.

In Bezug auf die Druckfestigkeit legt das Material ein hervorragendes Zweckverhalten an den Tag.

Dabei wird unterstrichen, dass sich die ermittelten Ergebnisse auf die Bruchfestigkeit der Prüflinge und nicht auf die effektive Bruchfestigkeit beziehen, da die Prüflinge nach Beendigung des Versuches wieder ihre ursprüngliche Position eingenommen haben.

Hinsichtlich des Verwendungszweckes des Gemisches Uretek **GEOPLUS®** ist stets erwiesen, dass die Druckfestigkeit bei gleichem Expansionsgrad höher als die erzeugte Expansionskraft ist. Diese Eigenschaft ist grundlegend für die Unumkehrbarkeit des Verfahrens Uretek Deep Injections.

Auch die Zug- und Biegefestigkeit zeigen sich mehr als zufriedenstellend; obwohl diese Eigenschaften für die Uretek Deep Injections nicht ausschlaggebend sind, kann man annehmen, dass sie zu einer Verbesserung des behandelten Bodens beitragen.

g. Alterungsbeständigkeit

Für jede abgeschlossene Arbeit liefert Uretek eine Beständigkeitsgarantie des konsolidierten Produktes für 10 Jahre. Aufgrund der Beschaffenheit des Gemisches liegt die Dauer jedoch sicherlich über dem obgenannten Zeitraum. Bekräftigt wird dies durch die Tatsache, dass die ersten Uretek-Anwendungen auf das Jahr 1975 zurückgehen und keine nennenswerten Änderungen der mechanischen und volumetrischen Eigenschaften des eingesetzten Harzes vorliegen.

Das Harz **GEOPLUS®** stellt eine Weiterentwicklung der damals verwendeten Harze dar und behält diese grundlegende Eigenschaft bei.

h. Permeabilitätskoeffizient

Das Harz **GEOPLUS®** besitzt einen Permeabilitätskoeffizient von 10^{-8} m/s.

Wird dieser Wert mit der Permeabilität der Böden verglichen, ähnelt er jenem des Lehms und liegt weit unter jenem des Sandes und des Schotters.

Nach seiner Einspritzung verringert das Harz in beachtlichem Maße die Permeabilität der körnigen Anhäufung und verhindert nachfolgende Auswaschungen, welche mit der Filterwassermenge und der Fließgeschwindigkeit zusammenhängen.

i. Volumengewicht

Das Gemisch Uretek **GEOPLUS®** besitzt ein expansionsgradabhängiges Volumengewicht. Empirischen Kenntnissen zufolge hat es nach der Konsolidierung im Fundamentboden ein variables Volumengewicht zwischen 150 und 300 kg/m³. Dieser Wert liegt etwa 6-12mal unter dem Volumengewicht eines Bodens und 3-6mal unter jenem des Wassers.

j. Reaktionsstabilität

Die chemische Reaktion des Gemisches Uretek **GEOPLUS®** hat das höchste Stabilitätsniveau erreicht. Im Unterschied zu den bis heute verwendeten Harzen und bekräftigt durch die vorhergehende Dokumentation sind die Eigenschaften des Harzes Uretek **GEOPLUS®** bei einer bestimmten Dichte viel weniger variabel. Dadurch können die Merkmale, die das im Boden injizierte Harzes annimmt, also sehr genauer vorausgesehen werden.

3. Zweiter Teil

a. Vorwort

Das Harz Uretek **GEOPLUS**® wurde zur Bewertung seiner physischen und mechanischen Grundeigenschaften einigen Laborversuchen unterzogen. Durchgeführt wurden im Besonderen:

- vertikale Druckversuche mit seitlich freier Expansion
- vertikale Expansionsversuche unter Dehnung
- einfache Zugversuche
- Biegeversuche

Die Versuche wurden im Geotechnischen Labor (Laboratorio geotecnico) und im Labor für Gesundheits- und Umweltechnik (Laboratorio di ingegneria sanitaria-ambientale) der Abteilung für Wasserbau-, Seebau-, Umwelt- und Geotechnik (Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica (IMAGE)) der Universität Padua sowie im Materiallabor der Abteilung für Bau und Transport (Costruzioni e Trasporti) der Universität Padua durchgeführt.

Als Bezug galten folgende Normen und Methoden:

- Norm UNI 6350-68 „Steife, zelluläre Kunststoffmaterialien - Bestimmung der Druckeigenschaften“
- Norm UNI 8071 „Steife, zelluläre Kunststoffmaterialien - Bestimmung der Zugeigenschaften“
- Norm UNI 7031-72 „Steife, zelluläre Kunststoffmaterialien - Bestimmung der Biegebelastung“

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse und einige Auswertungen präsentiert, die eine vollständige Beschreibung des realen Verhaltens des Harzes ermöglichen.

b. Vertikale Druckversuche mit seitlich freier Expansion

Das Experiment wurde am Geotechnischen Labor der Abteilung IMAGE der Universität Padua mit Bezugnahme auf die Norm UNI 6350-68 durchgeführt.

Für die Übertragung der vertikalen Zugkraft wurde eine Presse verwendet, die während des Versuches eine voreingestellte, konstante Vorschubgeschwindigkeit gleich 0.5mm/Minute beibehalten konnte.

Der Versuch wurde an würfelförmigen Prüflingen mit einer Seitenlänge von 50 mm und einem Volumengewicht zwischen 0.5 kN/m³ und 3.3 kN/m³ vorgenommen. Für jede ermittelte Dichte wurden 5 Prüflinge geprüft. Die maximale Druckfestigkeit wurde als Verhältnis zwischen der während des Versuches maximal ermittelten Belastung und der ursprünglichen Oberfläche des normalen Querschnittes in Belastungsrichtung definiert.

In Abbildung 1 ist der Verlauf der vertikalen Druckspannung in Abhängigkeit der vertikalen Deformation des Prüflings und der ursprünglichen Gemischdichte dargestellt. Gezeigt werden die experimentellen Kurven der Versuche an 10 Prüflingen mit unterschiedlichen Gemischen. Das Gemisch weist eine Festigkeit gegenüber dem einfachen Druck auf, die stark von der ursprünglichen Dichte abhängt. Die maximale Festigkeit ging nicht aus einem effektiven Bruch des Prüflings, sondern aus einem Ausrichtungsverlust zwischen der Vertikalachse des Prüflings und jener des Belastungskolbens hervor, was eine Fortführung des Versuches unmöglich machte; der Prüfling neigte sich in Richtung des geringeren Widerstandes, da er in seinem Inneren nicht mehr vollkommen homogen war.

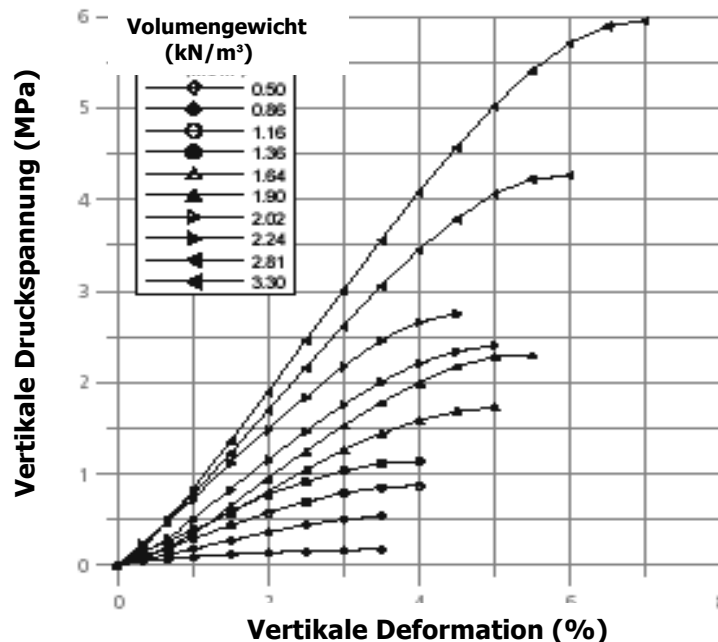


Abbildung 1 – Vertikale Druckprüfung mit seitlich freier Expansion: mittlerer Verlauf der vertikalen Spannung in Abhängigkeit der vertikalen Deformation und des einheitlichen Volumengewichtes des Prüflings.

Nach der Beseitigung der angewandten vertikalen Kraft nahm der Prüfling wieder seine ursprünglichen geometrischen Dimensionen und seine würfelförmige Form an. Das Material wies trotz einiger offensichtlicher Uneinheitlichkeiten zumindest im untersuchten Spannungsbereich einen guten Grad an Isotropie auf, da sich die Druckfestigkeit als unabhängig von der Ausrichtung des Prüflings auf der Presse erwies.

Definitionen

- **Volumengewicht:** Verhältnis zwischen Gesamtgewicht und Gesamtvolumen des Prüflings (in kN/m^3).
- **Vertikale Deformation:** Prozentuelles Verhältnis zwischen vertikaler Senkung und ursprünglicher Höhe des Prüflings (in %).
- **Vertikale Spannung:** Verhältnis zwischen der angewandten vertikalen Kraft und der ursprünglichen Oberfläche des normalen Querschnittes in Belastungsrichtung (in MPa).
- **Druckfestigkeit:** Verhältnis zwischen der angewandten maximalen vertikalen Kraft und der ursprünglichen Oberfläche des normalen Querschnittes in Belastungsrichtung (in MPa).
- **Elastizitätsmodul:** Verhältnis zwischen vertikaler Spannung und vertikaler Deformation, die bei einer vertikalen Deformation von 0.33% (E1), von 0.67% (E2) und von 1% (E3) ermittelt wurden (in MPa).

Innerhalb der untersuchten Volumengewichte γ - zwischen 0.5 kN/m^3 und 3.3 kN/m^3 - wurden mittlere Widerstände der einfachen Druckbelastung ermittelt, die zwischen 0.2 MPa und 6 MPa variieren. Die maximalen Festigkeitswerte wurden bei vertikalen Deformationen ε zwischen 3.5% (Prüflinge mit geringer ursprünglicher Dichte) und 7% (Prüflinge mit hoher ursprünglicher Dichte) erzielt. Die höchsten Druckfestigkeitswerte, die sich aus den Druckbelastungen der Prüflinge mit höchster Dichte ergaben, sind charakteristisch für weiches Gestein und deutlich höher als jene der lockeren Böden.

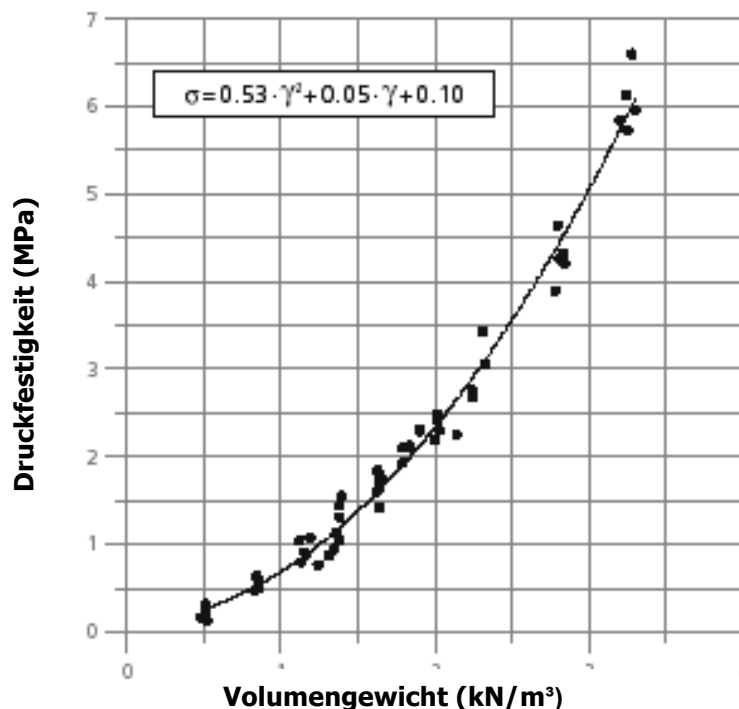


Abbildung 2 – Vertikale Druckprüfung mit seitlich freier Expansion: Verlauf der vertikalen Spannung in Abhängigkeit der vertikalen Deformation und des einheitlichen Volumengewichtes des Prüflings.

Die Abbildung 2 stellt die Druckfestigkeitswerte dar, die an 55 Prüflingen mit unterschiedlicher Dichte in Abhängigkeit des einheitlichen Volumengewichtes des Gemisches ermittelt wurden.

Sie veranschaulicht, wie die Druckfestigkeit mit dem Volumengewicht des Gemisches zunimmt. Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit σ (MPa) vom Volumengewicht γ (kN/m^3) wurde mittels Gleichung einer Parabel zweiten Gleichungsgrades ausgedrückt:

$$\sigma = 0.53 \cdot \gamma^2 + 0.05 \cdot \gamma + 0.10$$

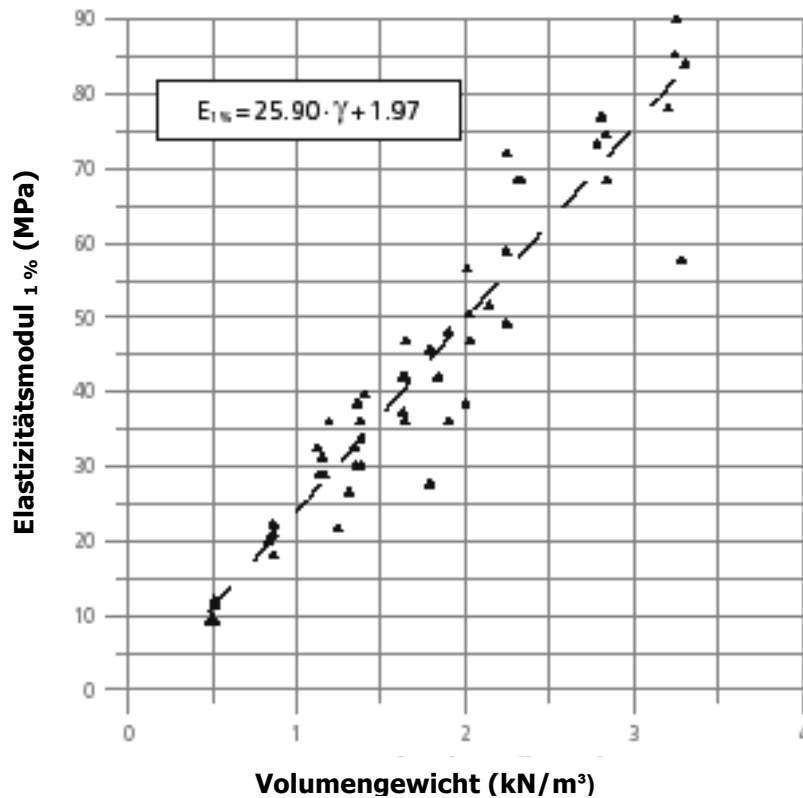


Abbildung 3 – Vertikale Druckprüfung mit seitlich freier Expansion: Verlauf des Elastizitätsmoduls für eine axiale Deformation von 1% in Abhängigkeit des Volumengewichtes des Prüflings.

Aus den experimentellen Kurven „vertikale Deformation ε - vertikale Druckspannung σ “ wurden - unter Berücksichtigung aufeinanderfolgender vertikaler Bezugsdeformationen ε gleich 0.33%, 0.67% und 1% - die ursprünglichen Elastizitätsmodule E ermittelt. So wurden die Elastizitätsmodule $E_{0.33\%}$, $E_{0.67\%}$, $E_{1\%}$ mit den folgenden mittleren Werteintervallen der Elastizitätsmodule E bestimmt:

$$E_{0.33\%} = 15 \div 70 \text{ MPa}$$

$$E_{0.67\%} = 10 \div 75 \text{ MPa}$$

$$E_{1\%} = 10 \div 85 \text{ MPa}$$

In Abbildung 3 ist der Verlauf des Elastizitätsmoduls $E_{1\%}$ in Abhängigkeit des Volumengewichtes des Prüflings ersichtlich. Die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls $E_{1\%}$ (MPa) vom Volumengewicht γ (kN/m^3) wurde mittels Gleichung einer Geraden einer Gleichung ausgedrückt:

$$E_{1\%} = 25.90 \cdot \gamma + 1.97$$

In Tabelle 1 werden vergleichsweise die Wertbereiche des Elastizitätsmoduls E für unterschiedliche Bodentypen dargestellt. URETEK GEOPLUS nimmt dabei Elastizitätsmodulwerte an, die mit jenen lockerer Böden vergleichbar sind. Dies bedeutet, dass die mittlere Anhäufungshärte eines mit URETEK GEOPLUS behandelten Bodens keine nennenswerten Veränderungen erfährt.

Abschließend kann man behaupten, dass die starke Abhängigkeit der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls von der ursprünglichen Dichte des Gemisches sowie die Vergleichbarkeit der Elastizitätsmodule des Gemisches mit jenen der lockeren Böden von großem Interesse sind.

Da die Dichte des Gemisches, das für professionelle Anwendungen eingesetzt wird, anhand der Injektionszeiten und injizierten Gemischmenge geregelt werden kann, scheint es möglich, die Baustellenarbeiten nach den mechanischen Eigenschaften, die in der behandelten Anhäufung erzielt werden sollen, auszurichten, ohne die mittlere Anhäufungshärte zu verändern, was anormale Umverteilungen der angewandten Spannungen zur Folge hätte.

Tabelle 1 – Ursprüngliche Elastizitätsmodule verschiedener lockerer Bodentypen (Das, Principles of Foundation Engineering, 2nd edition, PWS – Kent, Boston, Usa, 1990, Seite 161).

Bodentyp	E (MPa)	E (MPa) URETEK GEOPLUS®
Lockerer Sand	10÷25	15÷85
Sand mittlerer Dichte	15÷30	
Dichter Sand	35÷55	
Schlickiger Sand	10÷20	
Sand und Schotter	70÷180	
Weicher Lehm	2÷5	
Lehm mittlerer Konsistenz	5÷10	
Harter Lehm	10÷25	

c. Zugversuche

Die Versuche wurden im Materiallabor der Abteilung für Bau und Transport der Universität Padua durchgeführt.

Als Bezug galt die Norm UNI 8071, ausgenommen für die Form des Querschnittes der Prüflinge, rund und nicht rechteckig. Es wurden Prüflinge mit variablem Querschnitt längs der Achse und mittiger Verjüngung verwendet.

Der Durchmesser des in der Mitte des Prüflings geschmälerten Querschnittes entsprach 25 mm±/ 0.5mm. Der Durchmesser des an den Enden des Prüflings erweiterten Querschnittes entsprach 40mm.

Definitionen

- **Volumengewicht:** Verhältnis zwischen Gesamtgewicht und Gesamtvolumen des Prüflings (in kN/m³).
- **Zugspannung:** Verhältnis zwischen der angewandten vertikalen Zugkraft T und der ursprünglichen Oberfläche (Durchmesser ϕ) des normalen Querschnittes in Belastungsrichtung, gemessen im Bereich der Verjüngung (in MPa).
- **Zugfestigkeit:** Verhältnis zwischen der angewandten maximalen vertikalen Zugkraft T und der ursprünglichen Oberfläche (Durchmesser ϕ) des normalen Querschnittes in Belastungsrichtung, gemessen im Bereich der Verjüngung (in MPa).

Für die Übertragung der vertikalen Zugkraft wurde eine Vorrichtung verwendet, die während des Versuchs eine konstante Vorschubgeschwindigkeit gleich 5mm/Minute beibehält. Es wurden 14 Prüflinge unterschiedlicher Dichte benutzt und ein Volumengewichtsbereich zwischen 0.7 kN/m³ und 5 kN/m³ untersucht.

Die Zugfestigkeit ergab - wie auch die Druckfestigkeit - eine starke Abhängigkeit von der Gemischdichte, die mit der ursprünglichen Dichte des Gemisches selbst zunimmt. Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse weisen bei einheitlicher Volumengewichte von 0.7 kN/m³ bis 5 kN/m³ Zugfestigkeiten σ_{Zug} zwischen 0.5 MPa und 8 MPa auf.

Die Abhängigkeit der Zugfestigkeit σ_{Zug} (MPa) vom Volumengewicht γ (kN/m³) wurde mittels Gleichung einer Parabel zweiten Gleichungsgrades ausgedrückt:

$$\sigma_{Zug} = 0.21 \cdot \gamma^2 + 0.55 \cdot \gamma - 0.10$$

Für die derzeit von Uretek vorgesehenen Anwendungen scheint die Zugfestigkeit des Gemisches weniger relevant als die anderen ermittelten mechanischen Eigenschaften zu sein. Dennoch kann dieser Parameter in Hinblick auf neue Anwendungen Bedeutung erlangen, weil er es erlaubt, dem behandelten Boden einen Zugwiderstand zu liefern oder diesen zu erhöhen.

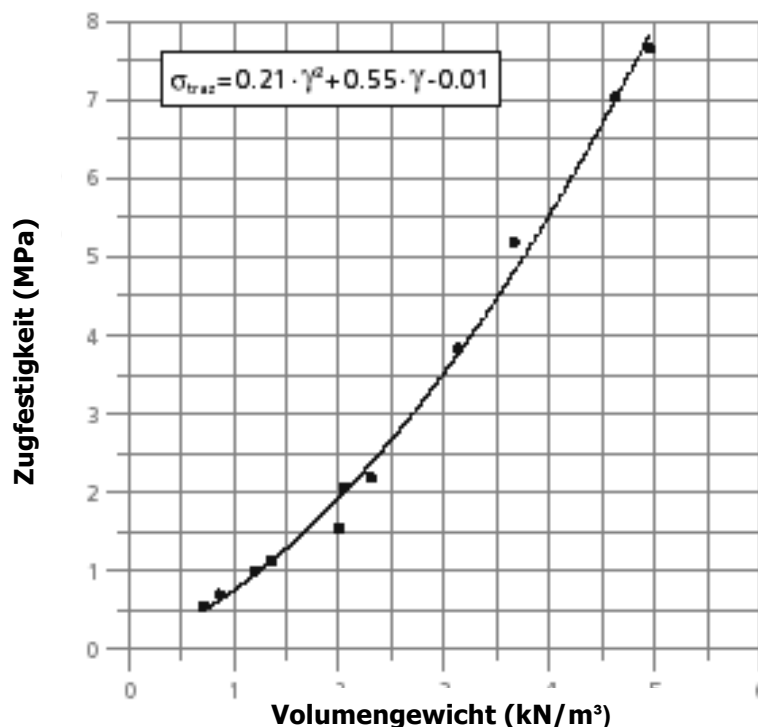


Abbildung 4 – Einfacher Zugversuch: Verlauf der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Volumengewichtes des Gemisches.

d. Expansionsversuche unter Dehnung

(Das Harz Uretek Geoplus besitzt eine maximale Expansionskraft unter Dehnung gleich 10.000 kPa. Die kompletten Ergebnisse der Expansionsversuche des Harzes Uretek Geoplus können leider nicht veröffentlicht werden, da sie Bestandteil des Uretek Know-hows und durch ein Industriepatent geschützt sind).

e. Biegeversuche

Die Versuche wurde im Materiallabor der Abteilung für Bau und Transport der Universität Padua durchgeführt.

Als Bezug galt die Norm UNI 7031-72. Für die Biegeversuche bediente man sich einer Maschine, die eine voreingestellte und konstante Verschiebegeschwindigkeit des für die Übertragung der Belastung notwendigen Biegemessers ermöglichte. Die Vorrichtung war mit einem Biegemesser für die Übertragung der Belastung und zwei im Abstand von 80 mm angebrachten Auflagen ausgestattet. Der Querschnitt der untersuchten Prüflinge wies eine rechteckige Form mit einer Breite von 25 mm (+/- 0.4mm) und eine Höhe von 20 mm (+/- 0.4mm) auf.

Dem Biegeversuch wurden 35 Prüflinge unterschiedlicher Dichte unterzogen. Es wurde ein Volumengewichtsbereich zwischen 1.19 kN/m³ und 4.81 kN/m³ untersucht. Die Biegebelastung entsprach dem angewandten Belastungswert beim Bruch.

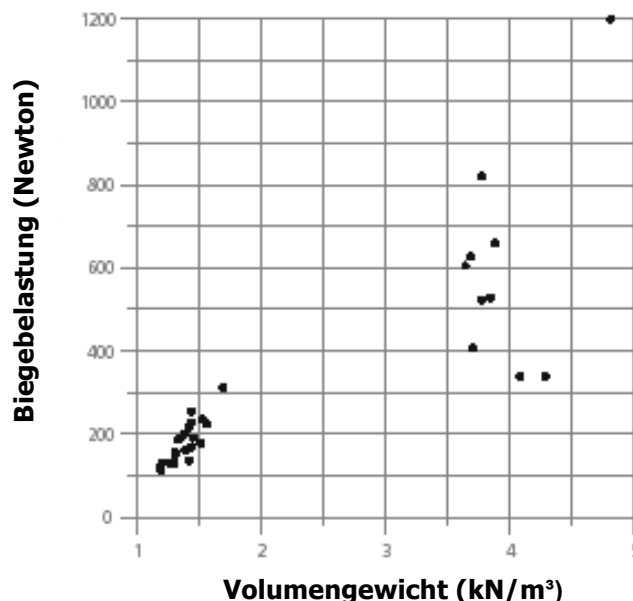


Abbildung 7 – Biegeversuch

In Abbildung 7 sind die Biegebelastungswerte in Abhängigkeit des Volumengewichtes des Gemisches dargestellt. Wie in den vorhergehenden Fällen erhöht sich zusammen mit der Gemischdichte auch der Biegebelastungswert.

Definitionen

- **Volumengewicht:** Verhältnis zwischen Gesamtgewicht und Gesamtvolumen des Prüflings (in kN/m³).
- **Biegebelastung:** Auf der Mittellinie des Prüflings angewandte Belastung beim Bruch (in N).

Im Vergleich zu den anderen Versuchsergebnissen wird bei den höchsten Prüfdichten eine höhere Verteilung der Daten beobachtet. Man nimmt an, dass dieser Umstand von einer nicht vollkommenen Homogenität der Prüflinge in Bezug auf die Art der Untersuchung beeinflusst wird.

Für die derzeit von Uretek vorgesehenen Anwendungen scheint die Biegefestigkeit des Gemisches weniger relevant als die anderen ermittelten mechanischen Eigenschaften zu sein. Dennoch kann dieser Parameter im Hinblick auf neue Anwendungen Bedeutung erlangen, weil er es erlaubt, dem behandelten Boden einen Biege widerstand zu liefern oder diesen zu erhöhen.

f. Schlussbemerkungen

Nach diesen ersten Laboruntersuchungen der URETEK GEOPLUS Gemischprüflinge ergibt sich, dass alle untersuchten mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Biegefestigkeit) eine Verbesserung der eigenen Maximalwerte bei Zunahme der Gemischdichte erfahren haben.

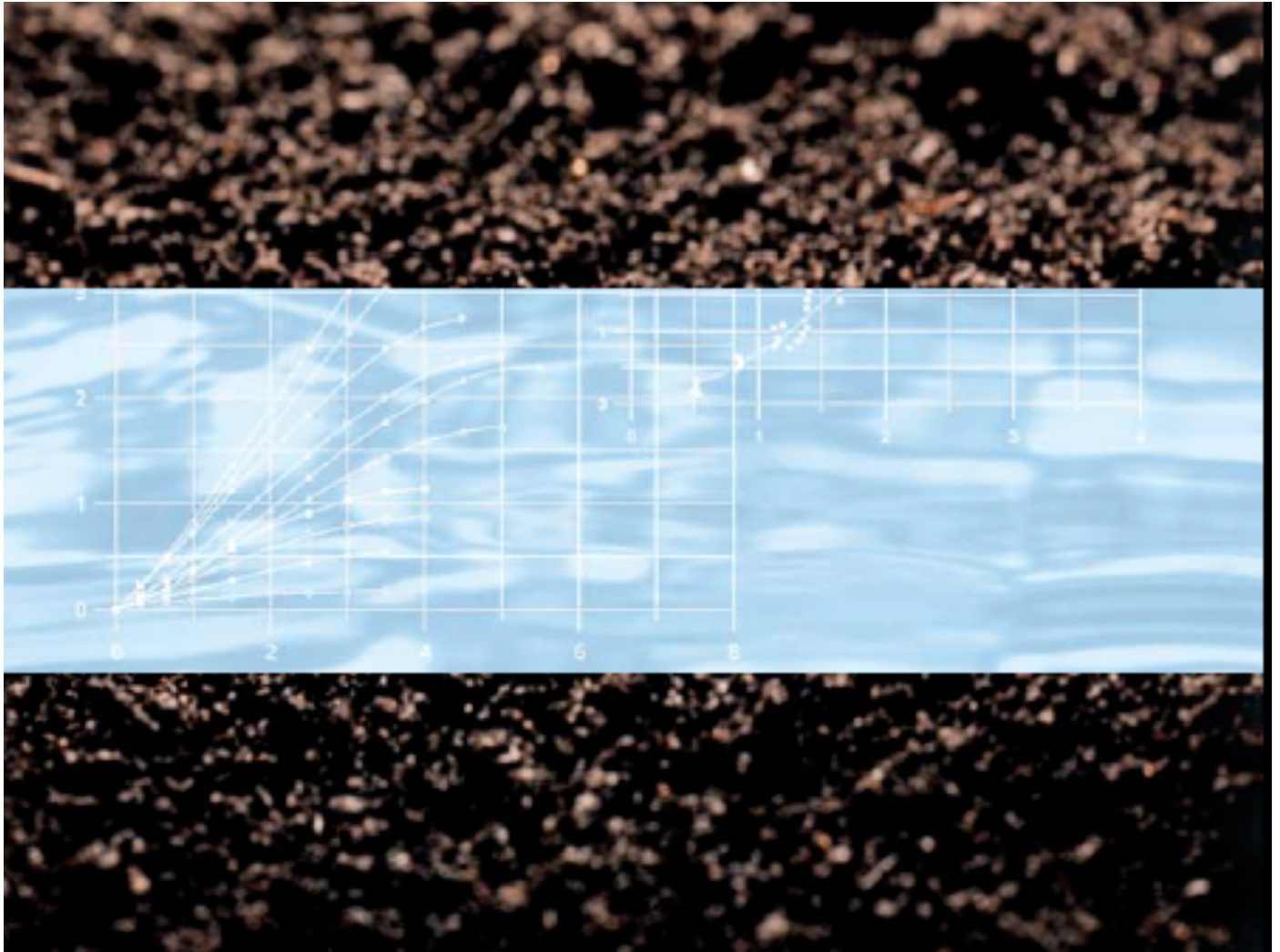
Ein weiterer, zu berücksichtigender Aspekt ist die Tatsache, dass das injizierte Gemisch im Boden einen Widerstandsanstieg bewirkt, ohne dessen Härte nennenswert zu verändern.

In Bezug auf Zug- und Biegeeigenschaften des Gemisches wurde unterstrichen, dass in einem lockeren Boden diese Eigenschaften kaum vorhanden sind und dass eine Gemischinjektion mit URETEK GEOPLUS der zu konsolidierenden Anhäufung Zug- und Biegefestigkeit liefern oder diese erhöhen kann.

Die experimentelle Methodologie des Expansionsversuches unter Dehnung und die erzielten Ergebnisse sind derzeit durch Industriepatent geschützt und können somit nicht veröffentlicht werden. Das Material besitzt eine maximale Expansionskraft unter Dehnung von 10.000 kPa, was einen Richtwert für die maximale Druckkraft darstellt, den das Gemisch im zu konsolidierenden Boden mit der Injektion von URETEK GEOPLUS erzeugen kann.

URETEK GEOPLUS®

Das superkonsolidierende Harz zu 10.000 kPa



URETEK®
EXPANSIONS-SYSTEME
ZUR KONSOLIDIERUNG DES UNTERGRUNDES

URETEK (Schweiz) AG • Wylstrasse 8 • CH-6052 Hergiswil
Tel. 041 676 00 80 • Fax 041 676 00 81 • Internet: www.uretek.ch • E-Mail: uretek@uretek.ch