

TEST D'INIEZIONE CON RESINA URETEK GEOPLUS®

Cliente:

Uretek Injektionstechnik GmbH

Indirizzo:

Mooslackengasse 17, 1190 Vienne

Autore:

DI Richard Niederbrucker

Marzo 2010

Exemplar 1

AIT-HE-0036

Indice

BREVE INTRODUZIONE	3
NOTE GENERALI.....	3
DOCUMENTAZIONE TECNICA URETEK GEOPLUS® - RIEPILOGO	3
<i>Principio di iniezione.....</i>	3
<i>Caratteristiche e composizione del materiale di iniezione.....</i>	3
<i>Parametri e criteri.....</i>	3
<i>Aspetti ambientali.....</i>	4
STUDI DI IDONEITÀ SOTTO FORMA DI PROVE DI INIEZIONE SU LARGA SCALA	4
1 NOTE GENERALI	6
1.1 NOTE GENERALI - AFFIDAMENTO DELL'INCARICO	6
1.2 STUDI ED INDAGINI ESEGUITI	6
1.3 LETTERATURA DI RIFERIMENTO	6
PARTE 1: DOCUMENTAZIONE TECNICA URETEK GEOPLUS®	7
A) DOCUMENTAZIONE TECNICA.....	7
MATERIALE DI INIEZIONE	7
<i>Caratteristiche e composizione</i>	7
<i>Aspetti ambientali.....</i>	7
<i>Parametri e criteri.....</i>	7
PRINCIPIO DI INIEZIONE E PROCEDIMENTO.....	8
<i>Principio di iniezione.....</i>	8
<i>Procedimento di iniezione</i>	8
ESECUZIONE	8
<i>Perforazione.....</i>	8
<i>Preparazione del materiale di iniezione.....</i>	8
<i>Pompaggio e distribuzione</i>	8
<i>Iniezione / processo di iniezione.....</i>	9
<i>Monitoraggio dell'edificio, verifica e controllo</i>	9
B) PROVE E INDAGINI	10
TEST DI PRINCIPIO	10
<i>Proprietà meccaniche della resina Uretek Geoplus®.....</i>	10
<i>Resistenza alla compressione monoassiale.....</i>	10
<i>Resistenza a trazione monoassiale</i>	11
<i>Comportamento deformativo</i>	11
<i>Caratteristiche di scorrimento sotto carico dinamico</i>	11
<i>Proprietà chimiche - Tossicità</i>	12
<i>Analisi degli eluati</i>	12
<i>Determinazione dell'ecotossicità.....</i>	12
PROVA DI IDONEITÀ	12
PARTE 2: PROVE DI INIEZIONE SU LARGA SCALA	13
NOTE GENERALI - STRUTTURAZIONE DELLE PROVE	13
RISULTATI E CONCLUSIONI DELLE INDAGINI GEOTECNICHE	15
<i>Terreno di natura non coesiva - Calcare di Leitha.....</i>	15
<i>Terreno coesivo - Tegel.....</i>	19
<i>Terreno coesivo - Löss.....</i>	23
RIEPILOGO E INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI INIEZIONE SU LARGA SCALA	27

Breve introduzione

Note generali

Il metodo Deep Injections® per il consolidamento e l'aumento della capacità portante del terreno sottostante le fondazioni con l'ausilio di resine espandenti è stato sviluppato e brevettato dalla società Uretek srl. Il materiale di iniezione Uretek Geoplus® è già impiegato con successo in numerosi paesi europei.

In Austria questo metodo trova ancora scarsa applicazione, in quanto mancano sperimentazioni su larga scala e il quadro normativo e giuridico a riguardo è ancora poco chiaro.

L'Austrian Institute of Technology GmbH è stato pertanto incaricato da Uretek Injektionstechnik GmbH di redigere un fascicolo tecnico basato sulla documentazione esistente e sulla base dei risultati delle prove condotte su larga scala, oltre che agli studi di idoneità generali sulla resina Uretek Geoplus® impiegata.

Documentazione tecnica Uretek Geoplus® - Riepilogo

Principio di iniezione

Il prodotto e il metodo in oggetto si definiscono a iniezione con compressione del terreno di fondazione (iniezione di compattazione, iniezione di fratturazione idraulica). Grazie all'elevata forza di espansione della resina iniettata, il terreno cedevole nei volumi circostanti il punto di iniezione ne risulterà compattato.

Caratteristiche e composizione del materiale di iniezione

Il materiale di iniezione Uretek Geoplus® consiste in un sistema poliuretanico bicomponente, composto sostanzialmente da polioli e isocianati. Il prodotto, che viene iniettato nel terreno sotto forma di soluzione, polimerizza aumentando di volume. I due componenti di sistema sono definiti Geoplus® A e Geoplus® B.

Parametri e criteri

Pressione di espansione: la pressione di espansione della miscela bifase è pari a 10.000 kPa e diminuisce con l'aumentare del grado di espansione, fino a raggiungere uno stato di equilibrio nel terreno.

Grado di espansione: il grado di espansione del prodotto Uretek Geoplus®, in funzione della resistenza del terreno, è compreso tra il 200 e il 2000% del volume iniziale iniettato.

Resistenza meccanica: la resistenza meccanica della resina espansa e indurita è funzione del grado di espansione. Per pesi specifici compresi tra 0,5 e 3,3 kN/m³ sono stati determinati valori di resistenza da 0,2 a 6,0 MPa.

Stabilità nel tempo: Uretek fornisce una garanzia di 10 anni sugli interventi di iniezione eseguiti. Anni di esperienza dimostrano tuttavia che il materiale iniettato resiste ben oltre questo lasso di tempo.

Peso specifico: il peso specifico della resina iniettata dipende dal grado di espansione ed è compreso tra 150 e 300 kg/m³ nel terreno.

Permeabilità all'acqua: la resina espansa e indurita possiede un coefficiente di permeabilità pari a $k_f = 10^{-8}$ m/s. Questo valore corrisponde all'incirca alla permeabilità di un terreno argilloso. Nei terreni di natura non coesiva, la resina riduce la permeabilità e impedisce la comparsa di fenomeni di suffosione ed erosione.

Aspetti ambientali

Su provini di resina poliuretana polimerizzata sono state condotte analisi tossicologiche del suolo. Il prodotto non risulta classificabile come tossico o nocivo e di conseguenza non è classificabile come soggetto all'identificazione R 54 (tossico per la flora).

Inoltre, sono state condotte prove di dilavamento su provini di suolo iniettato. I risultati non hanno evidenziato alcuna controindicazione all'uso del prodotto Uretek Geoplus®.

Studi di idoneità sotto forma di prove di iniezione su larga scala

Scopo degli studi era dimostrare l'effetto positivo della miscela per iniezione Uretek Geoplus® sulla capacità portante di terreni naturali di varia natura utilizzando metodi convenzionali di indagine geotecnica. Le indagini condotte hanno previsto la realizzazione di prove penetrometriche dinamiche con strumento DPL; la misurazione della densità e del contenuto di acqua con sonda isotopica; la determinazione del modulo di deformazione dinamica con piastra di carico dinamica; nonché la conduzione di prove di carico con piastra circolare (DN 600 mm).

Come substrati naturali sono stati utilizzati un terreno di natura non coesiva (calcare di Leitha) e due terreni coesivi (tegel e löss). Questi terreni sciolti sono molto diffusi in Austria e possono quindi essere considerati rappresentativi.

Tutte le prove sono state condotte in presenza di condizioni al contorno ben definite e riproducibili (densità a secco, contenuto d'acqua, grado di compattazione) in modo da assicurare la comparabilità dei risultati.

I risultati ottenuti dagli studi possono essere riassunti come segue:

- I risultati delle prove di carico evidenziano con chiarezza l'effetto positivo derivato dall'espansione del materiale iniettato sul comportamento di deformazione nonché sulla capacità portante dei tipi di suolo oggetto dell'indagine.
- Nel caso dei terreni non coesivi (calcare di Leitha), con l'iniezione si è potuta ottenere una netta riduzione delle deformazioni indotte dal carico simulato sulle fondazioni. La curva di deformazione sotto carico risulta decisamente appiattita. Il ciclo di scarico mostra analogamente un andamento orizzontale: si tratta pertanto di deformazioni plastiche. È possibile pertanto concludere che non vi sono comportamenti deformativi del materiale iniettato successivamente alla sua polimerizzazione. L'osservazione dei volumi di terreno iniettati rivela che il materiale ha completamente permeato i vuoti, dando origine a una struttura del terreno che presenta le caratteristiche di un conglomerato. L'espansione della resina è avvenuta uniformemente su un'ampia superficie.
- Anche nel caso dei terreni di natura coesiva (tegel, löss), l'iniezione ha determinato una netta riduzione degli assestamenti indotti dalla prova di carico. Inoltre anche la capacità portante risulta decisamente migliorata. Ciò appare evidente se si osservano le curve di deformazione sotto carico del tegel. Il tegel non iniettato raggiunge la sua capacità portante limite già a ca. 200 kN/m², mentre il terreno iniettato con resina Geoplus® sopporta un carico limite di 400 kN/m². La resina ha formato nel tegel un fitto reticolo di lame: è grazie a questa struttura lamellare che si verificano da un lato una

compattazione localizzata del terreno in prossimità delle lame e dall'altro il suo irrobustimento per effetto del reticolo.

- A causa della sua compattezza estremamente allentata, il terreno di löss analizzato rappresenta un caso a parte. Nel terreno non iniettato, la capacità portante limite viene raggiunta fin dai primi cicli di carico. In seguito all'iniezione risulta invece applicabile un carico fino a 100 kN/m^2 con assestamenti ancora accettabili: ciò significa un netto aumento della capacità portante e al contempo la riduzione degli assestamenti risultanti.

1 Note generali

1.1 Note generali - Affidamento dell'incarico

Il metodo per il consolidamento e l'aumento della capacità portante del terreno sottostante le fondazioni con l'ausilio di resine espandenti è stato sviluppato e brevettato dalla società Uretek. Il materiale di iniezione Uretek Geoplus® è già impiegato con successo in numerosi paesi europei.

In Austria questo metodo trova ancora scarsa applicazione, in quanto mancano sperimentazioni su larga scala e il quadro normativo e giuridico al riguardo è ancora poco chiaro.

L'Austrian Institute of Technology GmbH è stato pertanto incaricato da Uretek Injektionstechnik GmbH di redigere un fascicolo tecnico basato sulla documentazione esistente e sulla conduzione di studi di idoneità generali sul prodotto Uretek Geoplus® sotto forma di prove di iniezione su larga scala.

1.2. Studi ed indagini eseguiti

Nel prosieguo, i lavori eseguiti vengono suddivisi in due parti:

Parte 1: Documentazione tecnica – scaturita dalle indagini già eseguite sul prodotto Uretek Geoplus® a cura di diversi organismi di prova.

Parte 2: Relazione delle prove di iniezione su larga scala condotte con il prodotto Uretek Geoplus® su terreni sciolti di varia natura.

1.3. Letteratura di riferimento

Per la redazione della relazione, è stata utilizzata la seguente letteratura di riferimento:

- Norme e direttive applicabili;
- Note tecniche e risultati delle prove di laboratorio sulla resina espandente di nuova generazione Uretek Geoplus®, a cura di Uretek in collaborazione con l'università di Padova;
- Analisi chimico-tossicologiche del materiale poliuretano bicomponente, Geoplus® A / Geoplus® B, Istituto di Igiene del Bacino della Ruhr;
- Resina Geoplus®, valutazione idro-igienica, Istituto di Igiene del Bacino della Ruhr;
- Schede di sicurezza prodotti Geoplus® A e Geoplus® B, Resina Chemie B.V.
- Determinazione delle caratteristiche del prodotto di provini di resina espandente Uretek Geoplus®, iFB Gauer.

PARTE 1: DOCUMENTAZIONE TECNICA URETEK GEOPLUS®

La presente documentazione tecnica è conforme ai capitoli pertinenti della ÖNORM EN 12715, Esecuzione di interventi geotecnici particolari (fondazioni speciali) - iniezioni, e fa riferimento alle prove menzionate nella ÖNORM B 4454.

A) Documentazione tecnica

MATERIALE DI INIEZIONE

Caratteristiche e composizione

Il materiale di iniezione Uretek Geoplus® consiste in un sistema poliuretano bicomponente, composto sostanzialmente da polioli e isocianati. Il prodotto, che viene iniettato nel terreno sotto forma di soluzione, polimerizza aumentando di volume. I due componenti di sistema sono definiti Geoplus® A e Geoplus® B.

Aspetti ambientali

Su provini di resina poliuretano polimerizzata sono state condotte analisi tossicologiche del suolo. Il prodotto non risulta classificabile come tossico o nocivo e di conseguenza non è classificabile come soggetto all'identificazione R 54 (tossico per la flora).

Inoltre, sono state condotte prove di dilavamento su provini di suolo iniettato. I risultati non hanno evidenziato alcuna controindicazione all'uso del prodotto Uretek Geoplus®.

Parametri e criteri

Pressione di espansione: la pressione di espansione della miscela bifase è pari a 10.000 kPa e diminuisce con l'aumentare del grado di espansione, fino a raggiungere uno stato di equilibrio nel terreno.

Grado di espansione: il grado di espansione del prodotto Uretek Geoplus®, in funzione della resistenza del terreno, è compreso tra il 200 e il 2000% del volume iniziale iniettato.

Resistenza meccanica: la resistenza meccanica della resina espansa e indurita è funzione del grado di espansione. Per pesi specifici compresi tra 0,5 e 3,3 kN/m³ sono stati determinati valori di resistenza da 0,2 a 6,0 MPa.

Stabilità nel tempo: Uretek fornisce una garanzia di 10 anni sugli interventi di iniezione eseguiti. Anni di esperienza dimostrano tuttavia che il materiale iniettato resiste ben oltre questo lasso di tempo.

Peso specifico: il peso specifico della resina iniettata dipende dal grado di espansione ed è compreso tra 150 e 300 kg/m³ nel terreno.

Permeabilità all'acqua: la resina espansa e indurita possiede un coefficiente di permeabilità pari a $k_f = 10^{-8}$ m/s. Questo valore corrisponde all'incirca alla permeabilità di un terreno argilloso. Nei terreni di natura non coesiva, la resina riduce la permeabilità e impedisce la comparsa di fenomeni di suffosione ed erosione.

PRINCIPIO DI INIEZIONE E PROCEDIMENTO

Principio di iniezione

Il prodotto e il metodo in oggetto si definiscono a iniezione con compressione del terreno di fondazione (iniezione di compattazione, iniezione di fratturazione idraulica). Grazie all'elevata forza di espansione della resina iniettata, il terreno cedevole nell'area circostante il punto di iniezione risulterà compattato.

Procedimento di iniezione

Iniezione del prodotto

Il prodotto viene iniettato nel terreno attraverso tubi in acciaio. In un apposito ciclo di lavoro vengono eseguiti, attraverso la fondazione, fori del diametro massimo di 26 mm che permettono di raggiungere con precisione il volume di terreno da trattare. Nei fori vengono poi inseriti tubi in acciaio con diametro di 14 mm. La fase di iniezione prevede l'utilizzo di una testa di iniezione con impugnatura a pistola che viene innestata e collegata all'estremità superiore del tubo. Alla testa di iniezione sono collegate due linee separate per i due componenti della resina. Attivando l'impugnatura a pistola, si determina l'immissione nel tubo dei due componenti preventivamente miscelati e il pompaggio a bassa pressione della miscela fino al punto di iniezione stabilito. Una volta iniettata, la miscela di resina inizia ad espandersi.

ESECUZIONE

L'esecuzione degli interventi di iniezione e di tutti i lavori accessori avviene esclusivamente a cura di personale qualificato Uretek.

Perforazione

Attraverso un procedimento di perforazione rotativa, le perforazioni eseguite attraverso la fondazione si spingono nel terreno fino alla profondità massima di posa dei condotti d'iniezione. Lo schema di perforazione viene scelto in funzione dei carichi soprastanti le fondazioni e delle loro dimensioni. Di norma si procede con iniezioni su tre livelli complessivi d'iniezione.

Preparazione del materiale di iniezione

I due componenti di cui consta la miscela per iniezione sono conservati in contenitori separati su un camion appositamente equipaggiato e non richiedono alcuna preparazione.

Pompaggio e distribuzione

I due componenti, immessi in condotti separati, vengono pompati a bassa pressione fino alla testa di iniezione. Solo all'azionamento del comando presente sull'impugnatura a pistola sulla testa di iniezione avviene la miscelazione dei due componenti e l'iniezione della miscela nel terreno. Non è necessario alcun meccanismo di regolazione della velocità della pompa, in quanto l'espansione nel punto di iniezione non avviene per effetto della pressione di iniezione bensì per la forza di espansione della resina miscelata.

Iniezione / processo di iniezione

L'iniezione avviene attraverso tubi di acciaio, non valvolati, inseriti nei fori obliqui temporanei. Per evitare l'affioramento della miscela, una piccola quantità di miscela di resina viene iniettata prima dell'inizio del processo di iniezione in modo da sigillare l'area circostante il tubo d'iniezione.

Dopo qualche istante di attesa, ha inizio il processo di iniezione. Azionando l'impugnatura a pistola sulla testa di iniezione, la miscela di resina viene convogliata a bassa pressione attraverso il tubo di acciaio fino al punto di iniezione. Non appena esce dal tubo, la resina inizia ad espandersi sviluppando una forza di espansione che può arrivare fino a 10.000 kPa. Questa pressione di espansione si trasmette direttamente sul terreno e determina:

- nel caso dei terreni granulari, la totale permeazione e il riempimento della matrice del terreno con conseguente formazione di un conglomerato monolitico.
- Nel caso di terreni di natura coesiva, la compattazione del terreno mediante la formazione di un fitto reticolo di lame.

L'elevata forza di espansione provoca oltre alla compattazione del terreno di fondazione anche un principio di sollevamento della fondazione. Procedendo secondo uno schema a griglia, le iniezioni sotto le fondazioni consentono di ottenere un sollevamento controllato.

Al termine dell'iniezione, i tubi di iniezione rimangono nel terreno. In caso di esecuzione dell'iniezione su più orizzonti, sarà iniettato per primo l'orizzonte superiore per poi procedere con il successivo una volta indurita la resina.

Nel caso delle iniezioni finalizzate a interventi di sollevamento, spesso sono inevitabili gli assestamenti dovuti al consolidamento dei terreni coesivi, tuttavia possono essere compensati mediante ulteriori iniezioni.

Monitoraggio dell'edificio, verifica e controllo

Durante le operazioni di iniezione, il consumo di miscela viene misurato in ciascun punto di iniezione e comparato con il consumo nominale di progetto. Durante le operazioni di iniezione vengono misurati anche i movimenti della struttura con l'ausilio di appositi livelli laser che permettono di regolare la quantità di prodotto.

B) PROVE E INDAGINI

Ad oggi il prodotto Uretek Geoplus® è già stato sottoposto a una serie di indagini. Segue un riepilogo degli studi e delle prove condotte in conformità con la metodologia prevista dalla norma austriaca ÖNORM B 4454. A tal fine occorre fare una distinzione tra test di principio e test di qualità. I test di principio servono a stabilire in generale se il prodotto è idoneo all'iniezione nel terreno allo scopo di conseguire il miglioramento del sottofondo e il sollevamento delle fondazioni. I test di qualità mirano invece ad accertare se gli interventi di iniezione abbiano consentito il raggiungimento degli scopi per cui il prodotto è impiegato.

TEST DI PRINCIPIO

Le prove di seguito presentate sono state condotte presso l'Università di Padova, dipartimento di geotecnica, e presso l'istituto di prova IFB Gauer in Germania: esse descrivono il comportamento di base del prodotto Uretek Geoplus®.

Proprietà meccaniche della resina Uretek Geoplus®

- **Resistenza alla compressione monoassiale**

La resistenza alla compressione monoassiale è stata determinata su provini di resina espansa e polimerizzata di forma cubica. I provini, aventi lato di 50 mm, presentavano un peso di volume compreso tra 0,5 kN/m³ e 3,3 kN/m³. Sono stati sottoposti a prova 5 provini per ciascun peso di volume indagato.

In funzione del peso di volume dei provini, il materiale risulta avere una resistenza alla compressione compresa tra 0,2 e 6,0 MPa, vedi figura 1. I risultati ottenuti non si riferiscono alla resistenza di rottura in quanto la prova non ha determinato la rottura dei provini bensì una forte deformazione orizzontale. Dopo lo scarico, la quasi totalità dei provini ha nuovamente assunto la geometria originaria. Le deformazioni verticali misurate erano comprese tra $\epsilon = 3,5\% - 7\%$.

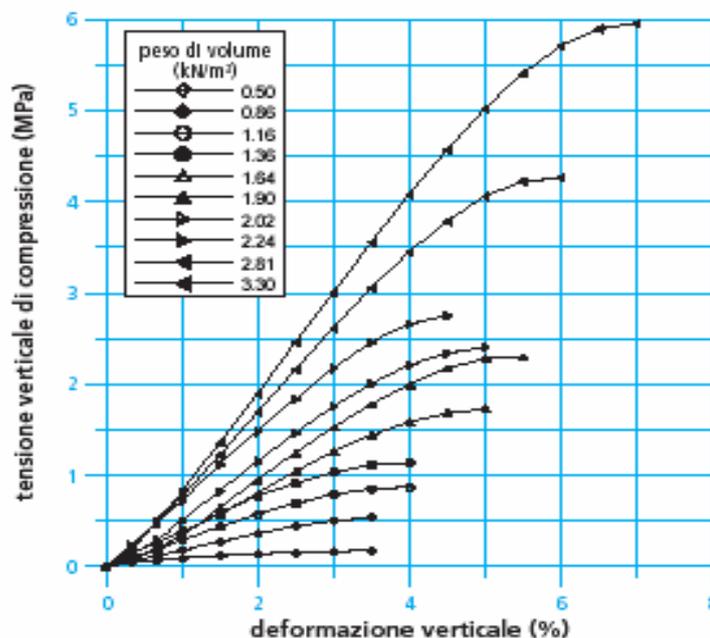


Figura 1, risultati delle prove di resistenza alla compressione monoassiale

I valori di resistenza alla compressione monoassiale determinati su provini ad elevato peso di volume sono ben superiori a quelli dei terreni naturali.

Dalle curve di deformazione per compressione, sono stati calcolati i moduli di elasticità corrispondenti a tre deformazioni (0,33; 0,67 e 1%). I risultati, compresi tra 15 e 85 MPa, sono nettamente superiori ai valori di terreni sciolti non coesivi o coesivi da molli a compatti.

- **Resistenza a trazione monoassiale**

Per le attuali applicazioni del prodotto la resistenza a trazione riveste una rilevanza relativa: rispetto ai terreni naturali la resina polimerizzata possiede una resistenza a trazione equiparabile alla resistenza a compressione. La prova di trazione è stata condotta su provini di sezione trasversale ridotta (25 mm). I valori di resistenza a trazione determinati per pesi di volume da 0,7 a 5,0 kN/m³ erano compresi nell'intervallo di valori 0,5÷8,0 MPa.

- **Comportamento deformativo**

Presso l'Istituto di prova IFB Gauer è stata indagata la curva forza-deformazione di provini di resina Uretek Geoplus® espansa e indurita, caratterizzati da pesi di volume diversi.

Nelle prove di compressione edometrica è stato determinato il comportamento deformativo di provini con pesi di volume compresi tra 1 e 3 kN/m³. Nel corso delle prove è stato possibile delimitare nettamente il campo di deformazione elastico-lineare da quello plastico e determinare le cosiddette massime tensioni sostenibili, sotto la cui azione non subentrano ancora deformazioni plastiche. Inoltre si sono potuti calcolare i moduli di elasticità validi per il campo elastico. Nella Tabella 1 sono riportati i risultati corrispondenti ai tre pesi di volume.

Tabella 1, riepilogo dei risultati delle prove

Densità	kg/m ³	100	200	300
Massima tensione sostenibile	N/mm ²	0.77	2.20	5.30
Deformazione	‰	50	40	90
Modulo di elasticità	N/mm ²	15.4	55.0	58.9

- **Caratteristiche di scorrimento sotto carico dinamico**

Sempre presso l'Istituto di prova IFB Gauer sono state condotte prove di compressione triassiali per la determinazione delle caratteristiche di scorrimento dei provini con pesi di volume diversi sotto carico dinamico. Il carico dinamico simula il passaggio di veicoli pesanti a più assi. I provini sono stati sottoposti a 20.000 cicli di carico con diverse ampiezze di pressione (0,5; 0,7 e 0,9 N/mm²) ed è stata misurata la deformazione.

Come prevedibile, i provini con peso di volume ridotto pari a 100 kg/m³ fanno registrare i valori di deformazioni più alti (0,7 mm) alla massima ampiezza di pressione. Ferma restando l'ampiezza, ma con un peso di volume di 200 kg/m³, la deformazione si riduce già a 0,2 mm. Le deformazioni sono riconducibili in gran parte a un consolidamento iniziale del provino: i valori di deformazione viscosa appaiono pertanto trascurabili.

Proprietà chimiche - Tossicità

- **Analisi degli eluati**

Per l'indagine delle caratteristiche di dilavamento, sono state condotte analisi degli eluati su carotaggi e assaggi di resina Uretek Geoplus® espansa e polimerizzata nel terreno. Al contempo è stata indagata l'eluibilità del terreno naturale.

I risultati delle prove di eluizione evidenziano differenze minime tra il provino di riferimento (terreno naturale) e i provini di resina. Rispetto all'impiego del prodotto Uretek Geoplus® non si rileva alcun sostanziale motivo di preoccupazione.

- **Determinazione dell'ecotossicità**

La determinazione dell'ecotossicità di Uretek Geoplus® è stata condotta su assaggi di resina espansa e indurita nel terreno. Nell'ambito dell'indagine si sono valutati l'inibizione della crescita delle piante, la tossicità sui lombrichi e la determinazione dell'inibizione dell'emissione luminosa dei batteri (test su batteri luminescenti).

In base ai risultati, il prodotto non risulta classificabile come tossico o nocivo e di conseguenza non è soggetto all'identificazione R 54 (tossico per la flora).

PROVA DI IDONEITÀ

L'idoneità del materiale di iniezione al miglioramento della capacità portante del sottofondo deve essere dimostrata attraverso prove di compressione su larga scala, vedi parte 2.

PARTE 2: PROVE DI INIEZIONE SU LARGA SCALA

Note generali - Strutturazione delle prove

Nell'autunno 2009 sono state condotte prove di iniezione su larga scala con il prodotto Uretek Geoplus® sul terreno dell'AIT.

Scopo delle prove era dimostrare l'efficacia del materiale di iniezione attraverso prove geotecniche di tipo convenzionale. Nell'ambito dell'indagine erano previste indagini con il penetrometro leggero DPL, misurazioni del contenuto di acqua con sonda isotopica, la determinazione del modulo di deformazione dinamica con piastra di carico dinamica, nonché la conduzione di prove di carico con piastra circolare (DN 600 mm).

Le prove si sono svolte su tre diversi tipi di terreni naturali, senza iniezione (terreno di riferimento) e con iniezione. Dal confronto dei risultati ottenuti con e senza iniezione è stata definita l'efficacia o l'azione migliorativa sul terreno della miscela per iniezione.

Tutte le prove sono state condotte in presenza di condizioni al contorno ben definite e riproducibili (densità a secco, contenuto di acqua, grado di compattazione), in modo da assicurare la comparabilità dei risultati.

Come substrati naturali sono stati utilizzati un terreno di natura non coesiva (calcare di Leitha), e due terreni coesivi (tegel e löss).

Le prove di iniezione sono state condotte in tre contenitori cilindrici riempiti con i tre terreni naturali.

In ogni contenitore è stato inserito un volume di terreno di circa 2,4 m³: i singoli terreni sono stati inseriti nei contenitori per la prova di riferimento (terreno non iniettato) e la prova di iniezione in condizioni pressoché uguali (densità e contenuto di acqua).

Nell'ambito delle prove di carico, sui contenitori è stato applicato in modo alternato un elemento portante costituito da due supporti a "I" in acciaio collegati l'uno all'altro mediante barre di acciaio. Il materiale inserito nei contenitori è stato sottoposto ad un carico ottenuto mediante una piastra di carico con diametro di 60 cm completa di cilindro idraulico e pressa. L'assestamento della piastra è stato registrato con l'ausilio di quattro comparatori centesimali. Nella figura 2 è illustrato l'intero meccanismo di prova, le figure 3 e 4 mostrano ulteriori dettagli.

Vantaggio di questo meccanismo di prova

- Condizioni al contorno definite con chiarezza.
- Terreno omogeneo con parametri chiaramente definibili (densità a secco, contenuto d'acqua).
- Possibilità di valutare visivamente l'intero volume migliorato.
- Indagine parallela di diversi tipi di terreno presso un unico sito (tre contenitori l'uno accanto all'altro con diversi tipi di terreno).

Scopo delle prove:

- Determinazione dei parametri geotecnici di base dei terreni iniettati con l'ausilio di metodi di indagine convenzionali (sondaggi, determinazione della densità)
- Determinazione delle curve cedimento/tempo per diversi carichi applicati.
- Comparazione del comportamento deformativo dei terreni iniettati e non iniettati in presenza di condizioni al contorno definite e con lo stesso procedimento di carico.
- Determinazione e comparazione del modulo di deformazione (E_v) dei terreni iniettati e non iniettati.

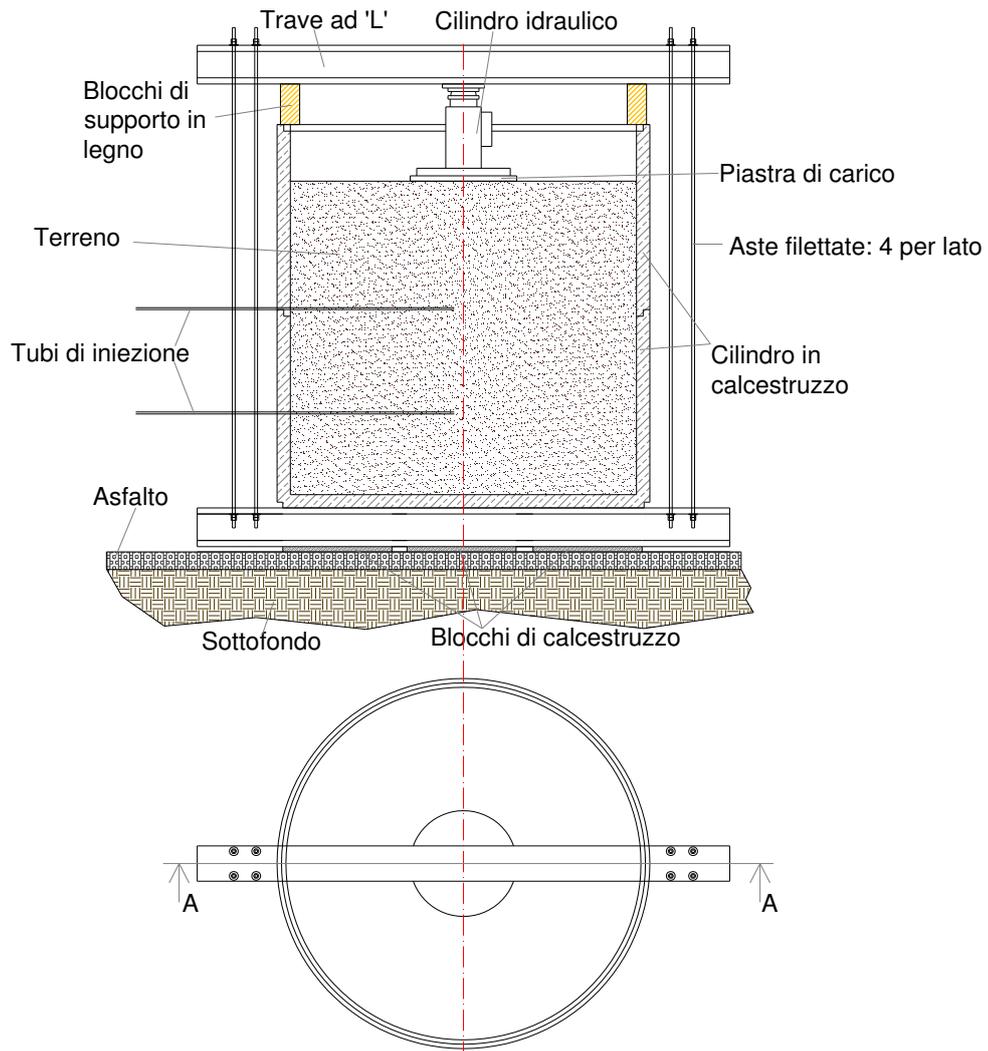


Figura 2, Schema del dispositivo di prova



Figura 3, Piastra di carico con elementi portanti



Figura 4, Cilindro idraulico e piastra di carico con dispositivi a comparatore

Risultati e conclusioni delle indagini geotecniche

Seguono i risultati delle prove geotecniche condotte e le conclusioni da essi deducibili per i tre tipi di terreno analizzati.

Terreno di natura non coesiva - Calcare di Leitha

- Prove di carico

Il calcare di Leitha iniettato, nominato Geoplus® negli schemi seguenti, si è dimostrato resistente al carico massimo di progetto pari a 500 kN/m². Nel caso del terreno non iniettato (terreno di riferimento), è stato necessario terminare la prova a 400 kN/m² in ragione dei forti assestamenti. Il grafico carico-deformazione rappresentato in figura 5 mostra con estrema chiarezza gli assestamenti sostanzialmente inferiori cui è soggetto il terreno iniettato rispetto al terreno di riferimento. In particolare gli incrementi di carico fino a 200 kN/m² producono assestamenti ridotti, mentre il terreno di riferimento in questo caso presenta valori maggiori di 10 volte.

Il ciclo di scarico a 300 kN/m² evidenzia per entrambi un andamento estremamente piatto, ovvero si tratta di deformazioni plastiche dell'intera struttura granulare. Non sembra esservi alcuna indicazione di una compressione e decompressione elastica della resina espansa.

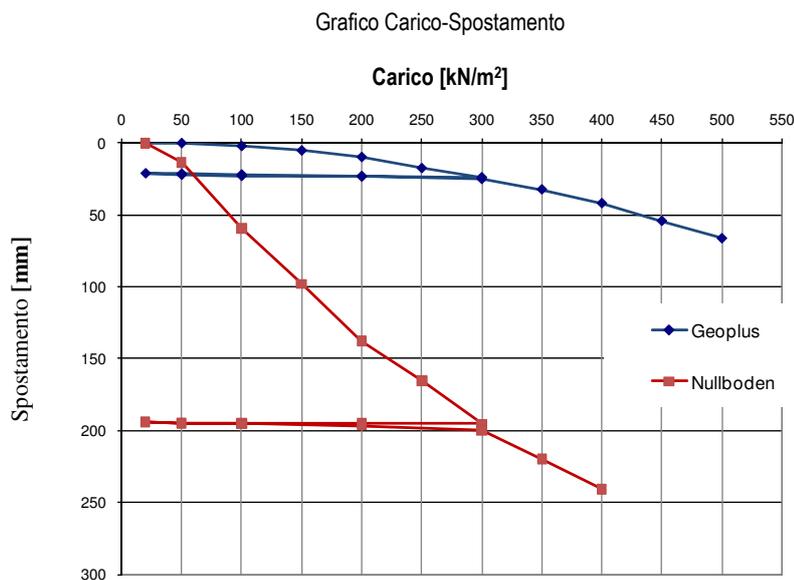


Figura 5, grafico carico-spostamento del calcare di Leitha iniettato e non iniettato

- Prove penetrometriche

In seguito alle prove di carico, sono stati eseguiti sondaggi con penetrometro leggero direttamente sotto la piastra di carico. I risultati delle prove sul terreno iniettato (Geoplus®) e sul terreno di riferimento sono illustrati in figura 6. Per i primi 30 cm non si evidenzia alcuna differenza sostanziale, poiché entrambi i terreni risultano ugualmente compattati per effetto del carico. Solo al di sotto, il sondaggio nel terreno iniettato fa registrare un

netto aumento della frequenza dei colpi per ogni 10 cm di penetrazione. Ad una profondità di 0,9 m, la prova penetrometrica nel terreno iniettato è stata arrestata avendo raggiunto il rifiuto strumentale dovuto alla presenza di un sasso.

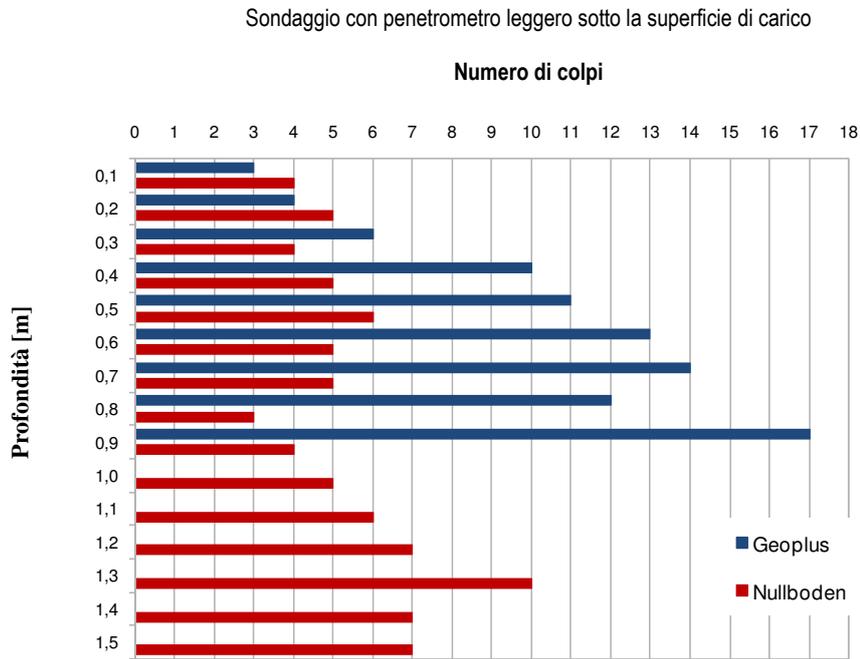


Figura 6, valutazione del sondaggio con penetrometro leggero nel calcare di Leitha

- Prova di carico dinamica su piastra

Dopo la prova di carico, con la piastra dinamica sono state eseguite anche misurazioni del modulo di deformazione dinamico nell'area sottostante la piastra di carico e in tre punti nel raggio di ca. 1 m. I risultati delle misurazioni sono riepilogati nella Tabella 2. Il punto di misurazione 1 si trova nell'area del terreno compattato per effetto delle prove di carico, gli altri tre punti di misurazione sono distribuiti nelle sue vicinanze. Il parametro Evd del terreno iniettato è di poco superiore a quello del terreno di riferimento.

Tabella 2, risultati delle prove di carico dinamiche su piastra

Punto di misurazione	Geoplus®	Terreno di riferimento
	Evd	Evd
1	17,36	15,62
2	12,59	8,67
3	14,97	12,80
4	10,94	11,58

- Valutazione visiva dell'area di iniezione

Per comprendere nel miglior modo possibile l'espansione e il comportamento della miscela iniettata nel terreno, al termine delle prove l'area di iniezione è stata scavata. Poiché gli anelli di calcestruzzo hanno un diametro di due metri, gli scavi effettuati con l'ausilio di un escavatore sono risultati difficoltosi. Anche utilizzando la pala più piccola, le possibilità di scavo erano comunque molto limitate. Pertanto si è dovuto ricorrere in larga misura allo scavo manuale.

Nel caso del calcare di Leitha di natura granulare, gli spazi vuoti sono stati permeati dalla miscela con conseguente formazione di un conglomerato monolitico dalle notevoli proprietà meccaniche, vedi figura 7. L'espansione della resina è avvenuta su un'ampia superficie in modo uniforme, figura 9. Ne è risultata una buona aggregazione con l'ammasso trattato. Direttamente in corrispondenza del punto di iniezione, al centro del tubo, si è formato un ammasso di resina caratterizzata da un'ottima resistenza, figura 8. In superficie non è stata rilevata alcuna fuoriuscita.



Figura 7, miscela di ghiaia e resina Uretek Geoplus®



Figura 8, area circostante il punto di iniezione



Figura 9, espansione della resina nella ghiaia

Terreno coesivo - Tegel

- Prove di carico

Il tegel iniettato, nominato Geoplus® negli schemi successivi, si è dimostrato resistente al carico massimo di progetto pari a 400 kN/m², vedi figura 10. Nel caso del terreno non iniettato (terreno di riferimento), è stato necessario terminare la prova a 200 kN/m² in ragione dei forti assestamenti, figura 10. Il grafico carico-spostamento rappresentato per il terreno di riferimento è da intendersi come stato di rottura. L'effetto dell'iniezione sul comportamento di assestamento sotto carico può essere definito eccellente. Per incrementi di carico fino a 200 kN/m², gli assestamenti risultano ridotti all'incirca di 10 volte. I successivi incrementi di carico evidenziano un aumento degli assestamenti leggermente superiore, senza tuttavia determinare condizioni propizie alla rottura del terreno.

Il ciclo di scarico a 300 kN/m² evidenzia per il terreno iniettato un andamento estremamente piatto, ovvero si tratta di deformazioni plastiche dell'intera struttura granulare. Non sembra esservi alcuna indicazione di una compressione e decompressione elastica della resina espansa.

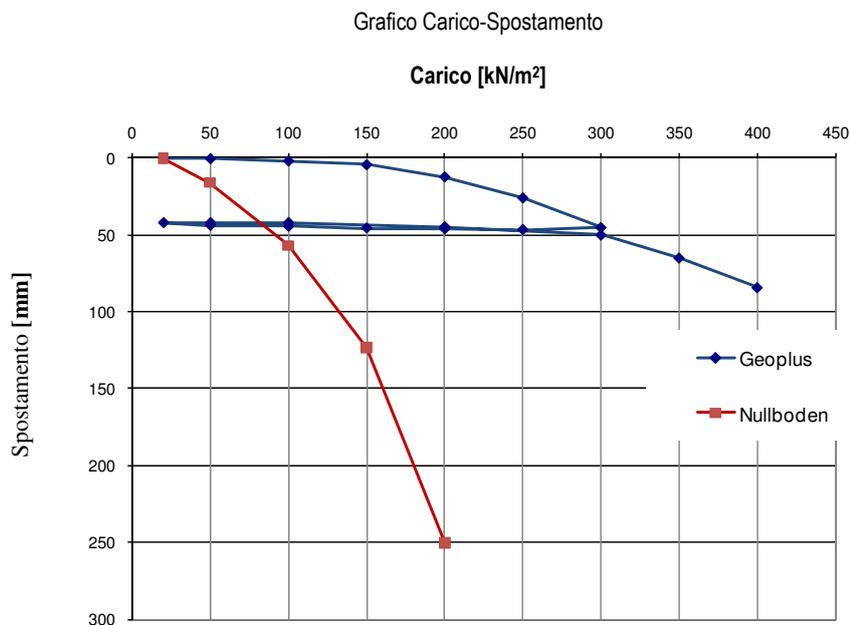


Figura 10, grafico carico-spostamento tegel

- Prove penetrometriche

In seguito alle prove di carico, sono stati eseguiti sondaggi con penetrometro leggero direttamente sotto la piastra di carico. I risultati delle prove sul terreno iniettato (Geoplus®) e sul terreno di riferimento sono illustrati in figura 11. Qui è chiaramente riscontrabile un aumento del numero dei colpi nel terreno iniettato. In particolare nell'area compresa tra 0 e 0,9 m, il terreno iniettato mostra all'incirca un aumento del 100% del numero di colpi per un avanzamento di 10 cm di penetrazione.

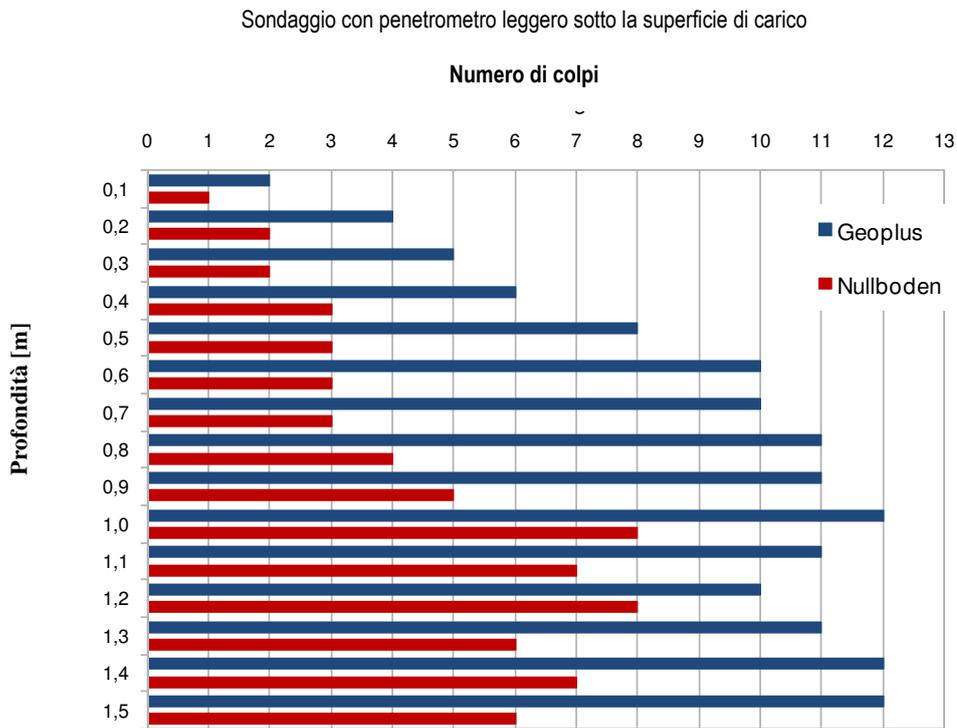


Figura 11, valutazione dei sondaggi con penetrometro leggero nel tegel

- Prova di carico dinamica su piastra

Dopo la prova di carico, con la piastra dinamica sono state eseguite anche misurazioni del modulo di deformazione dinamico nell'area sottostante la piastra di carico e in tre punti nel raggio di ca. 1 m. I risultati delle misurazioni sono riepilogati nella Tabella 3. Il punto di misurazione 1 si trova nell'area del terreno compattato per effetto delle prove di carico, gli altri tre punti di misurazione sono distribuiti nelle sue vicinanze. Il parametro E_{vd} del terreno iniettato è nettamente superiore a quello del terreno di riferimento. Come previsto, il punto di misurazione direttamente sotto il carico evidenzia in entrambi i terreni il valore di E_{vd} più alto, nel terreno iniettato questo valore è tuttavia maggiore di 3 volte. Questo dato, unitamente ai risultati del sondaggio penetrometrico, dimostra l'effetto migliorativo sul terreno anche nella fascia più alta, fino a ca. 1 m sotto la superficie.

Tabella 3, risultati delle prove di carico dinamiche su piastra nel tegel

Punto di misurazione	Geoplus®	Terreno di riferimento
	Evd	Evd
1	14,67	4,75
2	11,13	3,60
3	9,98	3,70
4	11,50	3,50

- Valutazione visiva dell'area di iniezione

Nel tegel, il materiale di iniezione ha costituito nel terreno un fitto reticolo di lame. Grazie a questa struttura lamellare si verificano da un lato una compattazione localizzata del terreno in prossimità delle lame e dall'altro il suo irrobustimento per effetto del reticolo. Le figure dalla 12 alla 14 mostrano la struttura lamellare. In superficie non si è osservata alcuna fuoriuscita di miscela.



Figura 12, espansione del materiale di iniezione nel tegel



Figura 13, espansione del materiale di iniezione nel tegel



Figura 14, espansione del materiale di iniezione nel tegel

Terreno coesivo - Löss

- Prove di carico

Il löss iniettato, denominato Geoplus® negli schemi successivi, non ha retto il carico massimo di progetto pari a 400 kN/m². A 200 kN/m² è stato necessario interrompere la prova di carico in ragione dei forti assestamenti, figura 15. Nel terreno non iniettato (terreno di riferimento), sono subentrati forti assestamenti già al primo incremento di carico. Il terreno di riferimento è quindi classificabile come non resistente. L'effetto dell'iniezione sul comportamento di assestamento sotto carico può comunque essere definito molto buono. Per incrementi di carico fino a 100 kN/m², gli assestamenti risultano ridotti all'incirca di 10 volte. I successivi incrementi di carico evidenziano un forte aumento degli assestamenti. Ad ogni modo è chiaramente riconoscibile un aumento della capacità portante per effetto dell'iniezione.

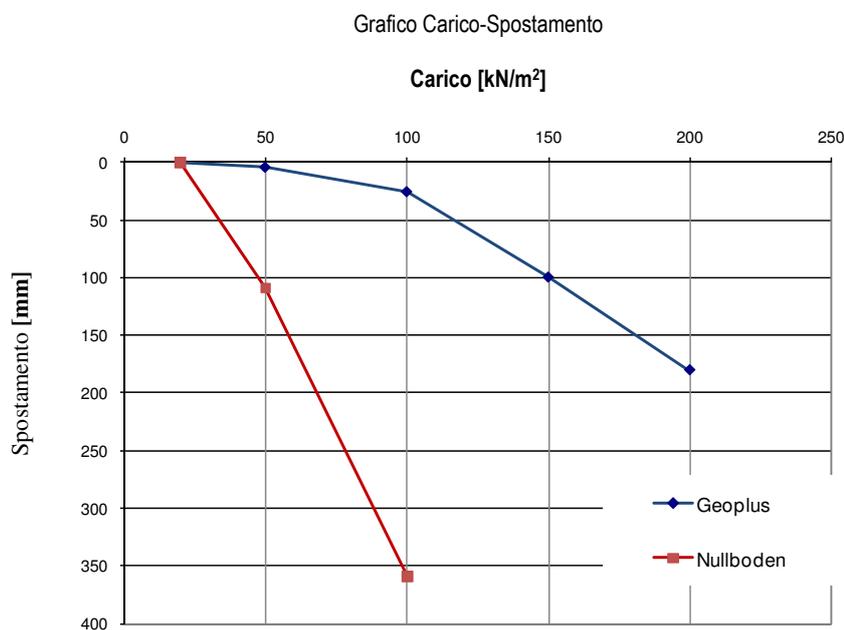


Figura 15, grafico carico-spostamento - löss

- Prove penetrometriche

In seguito alle prove di carico, sono stati eseguiti sondaggi con penetrometro leggero direttamente sotto la piastra di carico. I risultati delle prove sul terreno iniettato (Geoplus®) e sul terreno di riferimento sono illustrati in figura 16. Qui è chiaramente riscontrabile un aumento del numero di colpi nel terreno iniettato. Fino a una profondità di 0,5 m, la compattazione risultante dalle prove di carico è riconoscibile in entrambi i terreni. Al di sotto, il terreno di riferimento presenta una compattezza molto allentata, per contro il terreno iniettato evidenzia un aumento del numero di colpi N_{10} pari a tre/quattro volte i valori iniziali.

Sondaggio con penetrometro leggero sotto la superficie di carico

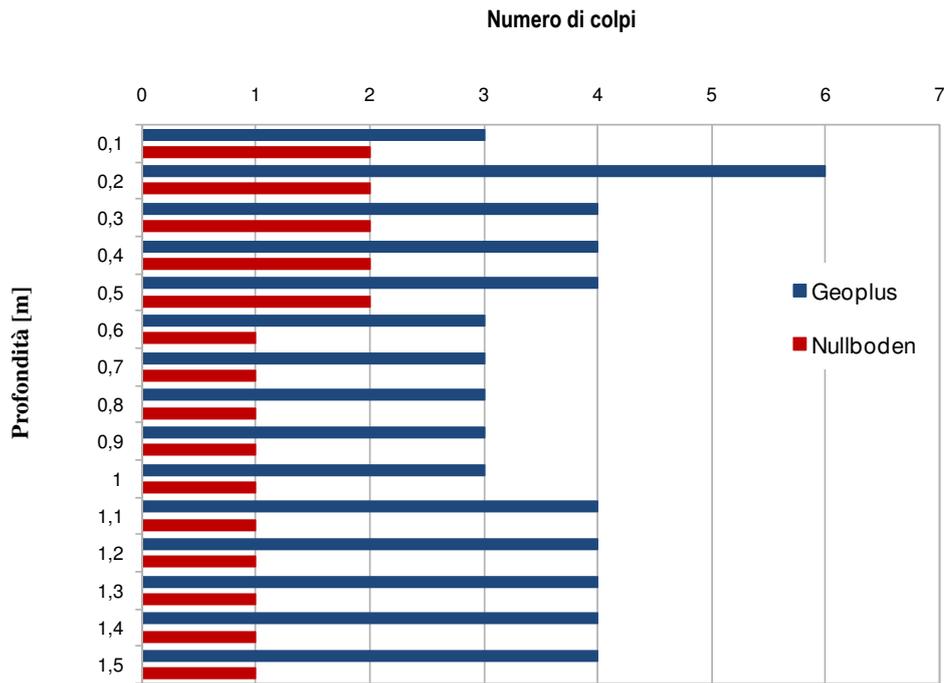


Figura 16, valutazione del sondaggio con penetrometro leggero nel löss

- Prova di carico dinamica su piastra

Dopo la prova di carico, con la piastra dinamica sono state eseguite anche misurazioni del modulo di deformazione dinamico nell'area sottostante la piastra di carico e in tre punti nel raggio di ca. 1 m. I risultati delle misurazioni sono riepilogati nella Tabella 4. Il punto di misurazione 1 si trova nell'area del terreno compattato per effetto delle prove di carico, gli altri tre punti di misurazione sono distribuiti nelle sue vicinanze. Il parametro Evd del terreno iniettato è di poco superiore a quello del terreno di riferimento.

Tabella 4, risultati delle prove di carico dinamiche su piastra sul löss

Punto di misurazione	Geoplus®	Terreno di riferimento
	Evd	Evd
1	13,35	13,31
2	6,45	4,52
3	5,77	5,04
4	6,10	5,08

- Valutazione visiva dell'area di iniezione

In ragione della compattezza estremamente allentata del löss, la resina fuoriuscendo dal tubo di iniezione ha occupato inizialmente un volume pressoché sferico, vedi figura 17. Durante la successiva espansione della resina si sono formate spesse lame orientate verso la superficie. In seguito il materiale di iniezione è fuoriuscito in superficie. In considerazione dell'elevata forza di espansione, la resina ha potuto comprimere il terreno sciolto ed è risalita in superficie a causa della bassa densità. Il fenomeno è chiaramente riconoscibile in figura 18 e 19.



Figura 17, espansione della resina nell'area circostante il punto di iniezione



Figura 18, espansione della resina nell'area circostante il punto di iniezione

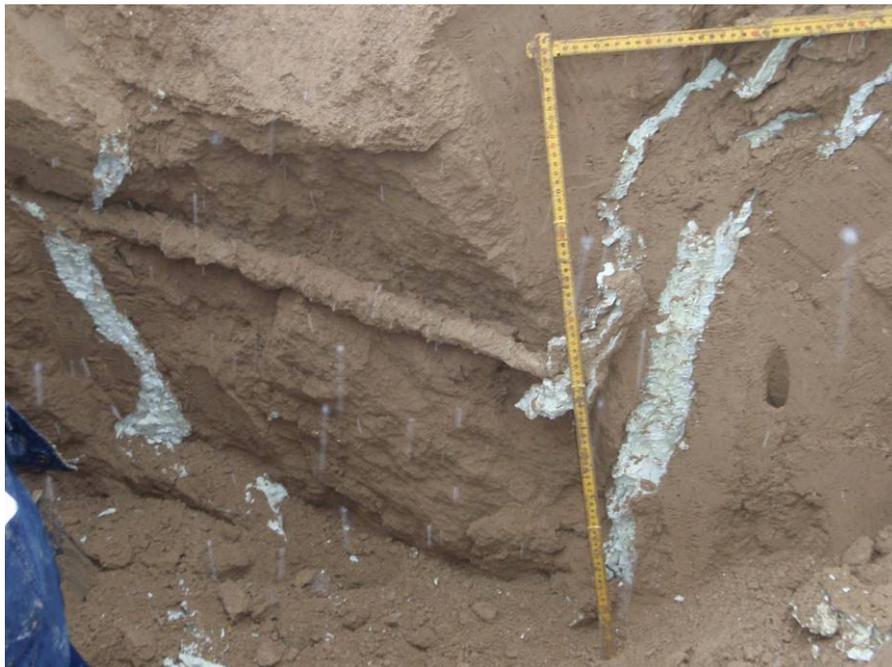


Figura 19, espansione della resina nell'area circostante il punto di iniezione

Riepilogo e interpretazione delle prove di iniezione su larga scala

Scopo delle indagini era dimostrare l'effetto positivo delle iniezioni di resina espandente Uretek Geoplus® sulla capacità portante di terreni naturali di varia natura utilizzando metodi convenzionali di indagine geotecnica. L'ambito di indagine stabilito comprendeva sondaggi con il penetrometro leggero DPL, misurazioni della densità e del contenuto di acqua con sonda isotopica, la determinazione del modulo di deformazione dinamica con piastra di carico dinamica, nonché la conduzione di prove di carico con piastra circolare (DN 600 mm).

Come substrati naturali sono stati utilizzati un terreno di natura non coesiva (calcare di Leitha) e due terreni coesivi (tegel e löss). Questi terreni sciolti sono molto diffusi in Austria e possono quindi essere considerati rappresentativi.

Tutte le prove sono state condotte in presenza di condizioni al contorno ben definite e riproducibili (densità a secco, contenuto di acqua, grado di compattazione), in modo da assicurare la comparabilità dei risultati.

I risultati ottenuti dagli studi possono essere riassunti come segue:

- I risultati delle prove di carico evidenziano con chiarezza l'effetto positivo del materiale di iniezione Uretek Geoplus® espanso e polimerizzato sul comportamento di deformazione nonché sulla capacità portante dei tipi di suolo oggetto dell'indagine.
- Nel caso dei terreni non coesivi (calcare di Leitha), con l'iniezione si è potuta ottenere una netta riduzione degli assestamenti indotti dal carico simulato sulle fondazioni. La curva di assestamento sotto carico risulta decisamente appiattita. Il ciclo di scarico mostra analogamente un andamento orizzontale: si tratta pertanto di deformazioni plastiche. Non vi è alcuna indicazione di una compressione e decompressione elastica della resina espansa. L'osservazione dell'area di iniezione rivela che il materiale ha completamente permeato i vuoti, dando origine a una struttura del terreno che presenta le caratteristiche di un conglomerato. L'espansione della resina è avvenuta uniformemente su un'ampia superficie.
- Anche nel caso dei terreni di natura coesiva (tegel, löss), l'iniezione ha determinato una netta riduzione degli assestamenti indotti dalla prova di carico. Inoltre anche la capacità portante risulta decisamente migliorata. Ciò appare evidente se si osservano le curve di assestamento sotto carico del tegel. Il tegel non iniettato raggiunge la sua capacità portante limite già a ca. 200 kN/m², mentre il terreno iniettato con resina Uretek Geoplus® è in grado di reggere il carico massimo di 400 kN/m². La resina ha formato nel tegel un fitto reticolo di lame: è grazie a questa struttura lamellare che si verificano da un lato una compattazione localizzata del terreno in prossimità delle lame e dall'altro il suo irrobustimento per effetto del reticolo.
- A causa della sua compattezza estremamente allentata, il terreno di löss analizzato rappresenta un caso a parte. Nel terreno non iniettato, la capacità portante limite viene raggiunta fin dai primi cicli di carico. In seguito all'iniezione risulta invece applicabile un carico fino a 100 kN/m² con assestamenti ancora accettabili: ciò significa un netto aumento della capacità portante e al contempo la riduzione degli assestamenti risultanti.