

TEST DE INYECCIÓN CON RESINA URETEK GEOPLUS®

Cliente:
Uretek Injektionstechnik GmbH

Dirección:
Mooslackengasse 17, 1190 Viena

Autor:
DI Richard Niederbrucker

Marzo 2010

Ejemplo 1
AIT-HE-0036



Índice

BREVE INTRODUCCIÓN	3
NOTAS GENERALES.....	3
DOCUMENTACIÓN TÉCNICA URETEK GEOPLUS® - RECAPITULACIÓN	3
<i>Principio de inyección</i>	3
<i>Características y composición del material de inyección</i>	3
<i>Parámetros y criterios</i>	3
<i>Aspectos medioambientales</i>	4
ESTUDIOS DE IDONEIDAD BAJO FORMA DE ENSAYOS DE INYECCIÓN EN GRAN ESCALA	4
1 NOTAS GENERALES	6
1.1 NOTAS GENERALES- ENTREGA DEL ENCARGO	6
1.2. ESTUDIOS E INVESTIGACIONES EJECUTADOS	6
1.3. LITERATURA DE REFERENCIA	6
PARTE 1: DOCUMENTACIÓN TÉCNICA URETEK GEOPLUS®	7
A) DOCUMENTACIÓN TÉCNICA	7
MATERIAL DE INYECCIÓN	7
<i>Características y composición</i>	7
<i>Aspectos medioambientales</i>	7
<i>Parámetros y criterios</i>	7
PRINCIPIO DE INYECCIÓN Y PROCEDIMIENTO	8
<i>Principio de inyección</i>	8
<i>Procedimiento de inyección</i>	8
EJECUCIÓN.....	8
<i>Perforación</i>	8
<i>Preparación del material de inyección</i>	Errore. Il segnalibro non è definito.
<i>Pompaje y distribución</i>	8
<i>Inyección / proceso de inyección</i>	9
<i>Monitorización del edificio, comprobación y control</i>	9
B) ENSAYOS E INVESTIGACIONES	10
TEST DE PRINCIPIO.....	10
<i>Propiedades mecánicas de la resina Uretek Geoplus®</i>	10
<i>Resistencia a la compresión monoaxial</i>	10
<i>Resistencia a la tracción monoaxial</i>	11
<i>Comportamiento deformativo</i>	11
<i>Características de escurrimiento bajo carga dinámica</i>	11
<i>Propiedades químicas - Toxicidad</i>	11
<i>Análisis de los eluidos</i>	11
<i>Determinación de la ecotoxicidad</i>	12
ENSAYO DE IDONEIDAD	12
PARTE 2: ENSAYOS DE INYECCIÓN EN GRAN ESCALA	13
NOTAS GENERALES- ESTRUCTURACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	13
RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LAS INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS	15
<i>Terreno de estructura no cohesiva – Piedra calcárea de Leitha</i>	15
<i>Terreno cohesivo - Tegel</i>	18
<i>Terreno cohesivo - Löss</i>	22
RECAPITULACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS DE INYECCIÓN EN GRAN ESCALA	27

Breve introducción

Notas generales

El método Deep Injections® para la consolidación y el aumento de la capacidad de sustentación del terreno subyacente la cimentación, con la ayuda de resinas expandentes, ha sido desarrollado y patentado por la sociedad Uretek srl. El material de inyección Uretek Geoplus® ya ha sido utilizado con éxito en numerosos países europeos.

En Austria este método encuentra todavía escasa aplicación, ya que faltan experimentaciones en gran escala y las normas jurídicas pertinentes son aún poco claras.

Por eso, Uretek Injektionstechnik GmbH ha encargado al Austrian Institute of Technology GmbH que redacte un expediente técnico basado en la documentación existente y en los resultados de los ensayos llevados al cabo en gran escala, además de los estudios generales de idoneidad sobre la resina de Uretek Geoplus® utilizada.

Documentación técnica Uretek Geoplus® - Recapitulación

Principio de inyección

El producto y el método en objeto se definen a inyección con compresión del terreno de cimentación (inyección de compactación, inyección de fracturamiento hidráulico). Gracias a la gran fuerza de expansión de la resina inyectada, el terreno deformable en los volúmenes circunstantes el punto de inyección resultará compactado.

Características y composición del material de inyección

El material de inyección Uretek Geoplus® consiste en un sistema de poliuretano bicomponente, compuesto principalmente por polioles e isocianatos. El producto, que se inyecta en el terreno bajo forma de solución, polimeriza aumentando su volumen. Los dos componentes de sistema se definen Geoplus® A e Geoplus® B.

Parámetros y criterios

- Presión de expansión: la presión de expansión de la mezcla bifásica es igual a 10.000 kPa y disminuye al aumentar el grado de expansión, hasta alcanzar un estadio de equilibrio en el terreno.
- Grado de expansión: el grado de expansión del producto Uretek Geoplus®, en función de la resistencia del terreno, está incluido entre 200 y 2000% del volumen inicial inyectado.
- Resistencia mecánica: la resistencia mecánica de la resina expandida y endurecida depende del grado de expansión. Para pesos específicos incluidos entre 0,5 y 3,3 kN/m³ se han determinado valores de resistencia de 0,2 a 6,0 MPa.
- Estabilidad en el tiempo: Uretek garantiza durante 10 años las intervenciones de inyección ejecutadas. Sin embargo años de experiencia confirman que el material inyectado resiste más allá de este lapso de tiempo.
- Peso específico: el peso específico de la resina inyectada depende del grado de expansión y está incluido entre 150 y 300 kg/m³ en el terreno.

Permeabilidad del agua: la resina expandida y endurecida posee un coeficiente de permeabilidad igual a $k_f = 10^{-8}$ m/s. Este valor corresponde casi a la permeabilidad de un terreno arcilloso. En los terrenos de estructura no cohesiva la resina reduce la permeabilidad e impide la aparición de fenómenos de sufusión y erosión.

Aspectos medioambientales

Han sido ejecutadas análisis toxicológicas del suelo sobre muestras de resina poliuretánica polimerizadas. El producto no resulta clasificable como tóxico o nocivo y en consecuencia no se puede clasificar como sujeto a la identificación R 54 (tóxico para la flora).

Además, han sido conducidos ensayos de derrubio sobre muestras de suelo inyectado. Los resultados no han evidenciado ninguna contraindicación en usar el producto Uretek Geoplus®.

Estudios de idoneidad bajo forma de ensayos de inyección en gran escala

Finalidad de los estudios era la de demostrar el efecto positivo de la mezcla para inyección Uretek Geoplus® sobre la capacidad de sustentación de los terrenos naturales de diferentes estructura, utilizando métodos convencionales de investigación geotécnica. Las investigaciones conducidas han previsto la realización de pruebas penetrométricas dinámicas con instrumento DPL; la medición de la densidad y del contenido de agua con sonda isotópica; la determinación del módulo de deformación dinámica con placa de carga dinámica; además de ensayos de carga con placa circular (DN 600 mm). Como sustratos naturales han sido utilizados un terreno de estructura no cohesiva (piedra calcárea de Leitha) y dos terrenos cohesivos (tegel e löss). Estos terrenos granulares son muy difundidos en Austria así que pueden considerarse representativos.

Todos los ensayos han sido conducidos en presencia de condiciones de contorno bien definidas y reproducibles (densidad en seco, contenido de agua, grado de compactación) para asegurar la comparabilidad de los resultados.

Los resultados obtenidos de los estudios se pueden resumir como sigue:

- Los resultados de los ensayos de carga evidencian con claridad, no sólo el efecto positivo originado por la expansión del material inyectado sobre el comportamiento de deformación, sino también sobre la capacidad de sustentación de los diferentes tipos de suelo, objeto de la investigación.
- Por lo que se refiere a los terrenos no cohesivos (piedra calcárea de Leitha), con la inyección se ha obtenido una clara disminución de las deformaciones inducidas por la carga simulada en la cimentación. La curva de deformación bajo carga resulta indudablemente aplastada. El ciclo de descarga muestra, de forma análoga, una evolución horizontal: se trata por consiguiente de deformaciones plásticas. Por eso, se puede concluir que no hay comportamientos deformativos del material inyectado después de su polimerización. El análisis de los volúmenes de terreno inyectados revela que el material ha impregnado las cavidades, dando origen a una estructura del terreno que presenta las características de un conglomerado. La expansión de la resina ha ocurrido de manera uniforme sobre una superficie amplia.
- También en el caso de terrenos de estructura cohesiva (tegel, löss), la inyección ha determinado una clara reducción de los asentamientos inducidos por la prueba de carga. Además, también la capacidad de sustentación resulta indudablemente mejorada. Esto parece evidente si se observan las curvas de deformación del Tegel bajo carga. El Tegel no inyectado

alcanza su capacidad de sustentación límite ya a unos 200 kN/m², mientras el terreno inyectado con resina Geoplus® soporta una carga límite de 400 kN/m². La resina ha formado en el Tegel un espeso retículo de lamas: es gracias a esta estructura lamelar que tienen lugar de un lado una compactación localizada del terreno cerca de las lamas y ,por otra parte, el mismo se fortalece por efecto del retículo.

- A causa de su compactibilidad extremadamente baja, el terreno de löss analizado representa un caso aparte. En el terreno no inyectado, la capacidad de sustentación límite se alcanza desde los primeros ciclos de carga. Después de la inyección resulta, en cambio, aplicable una carga hasta 100 kN/m² con asentamientos todavía aceptables: eso significa un claro aumento de la capacidad de sustentación y al mismo tiempo la reducción de los asentamientos resultantes.

1 Notas generales

1.1 Notas generales – Entrega del encargo

El método para la consolidación y el aumento de la capacidad de sustentación del terreno subyacente la cimentación con la ayuda de resinas expandentes ha sido desarrollado y patentado por la sociedad Uretek. El material de inyección Uretek Geoplus® ha sido utilizado ya en numerosos países europeos. En Austria este método encuentra todavía escasa aplicación, ya que faltan experimentaciones en gran escala y las normas jurídicas pertinentes son aún poco claras.

Por eso, Uretek Injektionstechnik GmbH ha encargado el Austrian Institute of Technology GmbH que redacte un expediente técnico basado en la documentación existente y en la conducción de estudios de idoneidad acerca del producto Uretek Geoplus® bajo forma de ensayos de inyección en gran escala.

1.2. Estudios e investigaciones ejecutados

A continuación los trabajos ejecutados se han dividido en dos partes:

Parte 1: Documentación técnica – procedente de las investigaciones ya ejecutadas sobre el producto Uretek Geoplus® bajo la dirección de diferentes organismos de ensayo.

Parte 2: Relación de las pruebas de inyección en gran escala hechas con el producto Uretek Geoplus® en terrenos granulares de diferente estructura.

1.3. Literatura de referencia

Para redactar la relación ha sido utilizada la siguiente literatura de referencia:

- Normas y disposiciones aplicables;
- Notas técnicas y resultados de las pruebas de laboratorio sobre la resina expandente de nueva generación Uretek Geoplus®, bajo la dirección de Uretek en colaboración con la Universidad de Padua;
- Análisis químico-toxicológicas del material poliuretánico bicomponente, Geoplus® A / Geoplus® B, Instituto de Higiene de la Cuenca del Ruhr;
- Resina Geoplus®, valoración hidro-higiénica, Instituto de Higiene de la Cuenca del Ruhr;
- Fichas de seguridad de los productos Geoplus® A e Geoplus® B, Resina Chemie B.V.
- Determinación de las características del producto de los ensayos de resina expandente Uretek Geoplus®, iFB Gauer.

PARTE 1: DOCUMENTACIÓN TÉCNICA URETEK GEOPLUS®

Esta documentación técnica es conforme a los capítulos pertinentes a ÖNORM EN 12715, Ejecución de intervenciones geotécnicas particulares (cimentación especial) – inyección, además hace referencia a los ensayos mencionados en ÖNORM B 4454.

A) Documentación técnica

MATERIAL DE INYECCIÓN

Características y composición

El material de inyección Uretek Geoplus® consiste en un sistema de poliuretano bicomponente, compuesto sustancialmente por polioles e isocianatos. El producto, que se inyecta en el terreno bajo forma de solución, polimeriza aumentando su volumen. Los dos componentes de sistema se definen Geoplus® A e Geoplus® B.

Aspectos medioambientales

Han sido ejecutadas análisis toxicológicas del suelo sobre muestras de resina poliuretánica polimerizada. El producto no resulta clasificable como tóxico o nocivo y en consecuencia no se puede clasificar como sujeto a la identificación R 54 (tóxico para la flora).

Además, han sido conducidos ensayos de derrubio sobre muestras de suelo inyectado. Los resultados no han evidenciado ninguna contraindicación en usar el producto Uretek Geoplus®.

Parámetros y criterios

- Presión de expansión: la presión de expansión de la mezcla bifásica es igual a 10.000 kPa y disminuye al aumentar el grado de expansión, hasta alcanzar un estadio de equilibrio en el terreno.
- Grado de expansión: el grado de expansión del producto Uretek Geoplus®, en función de la resistencia del terreno, está incluido entre 200 y 2000% del volumen inicial inyectado.
- Resistencia mecánica: la resistencia mecánica de la resina expandida y endurecida depende del grado de expansión. Para pesos específicos incluidos entre 0,5 y 3,3 kN/m³ se han determinado valores de resistencia de 0,2 a 6,0 MPa.
- Estabilidad en el tiempo: Uretek garantiza durante 10 años las intervenciones de inyección ejecutadas. Sin embargo años de experiencia confirman que el material inyectado resiste más allá de este lapso de tiempo.
- Peso específico: el peso específico de la resina inyectada depende del grado de expansión y está incluido entre 150 y 300 kg/m³ en el terreno.

Permeabilidad del agua: la resina expandida y endurecida posee un coeficiente de permeabilidad igual a $k_f = 10^{-8}$ m/s. Este valor corresponde casi a la permeabilidad de un terreno arcilloso. En los terrenos de estructura no cohesiva la resina reduce la permeabilidad e impide la aparición de fenómenos de sufusión y erosión.

PRINCIPIO DE INYECCIÓN Y PROCEDIMIENTO

Principio de inyección

El producto y el método en objeto se definen a inyección con compresión del terreno de cimentación (inyección de compactación, inyección de fracturamiento hidráulico). Gracias a la gran fuerza de expansión de la resina inyectada, el terreno deformable en los volúmenes circunstantes el punto de inyección resultará compactado.

Procedimiento de inyección

Inyección del producto

El producto se inyecta en el terreno a través de tubos de acero. Durante un ciclo apropiado de trabajo se ejecutan, a través de la cimentación, unos agujeros de diámetro máximo de 26mm, los cuales permiten alcanzar con precisión el volumen de terreno que hay que tratar. Después en los agujeros se introducen unos tubos de acero de diámetro de 14mm. La fase de inyección prevee el uso de una cabeza de inyección con empuñadura de pistola que se injerta y conecta a la extremidad superior del tubo. Al activar la empuñadura de pistola se determina la inmisión en el tubo de los dos componentes anteriormente mezclados y el pompaje a baja presión de la mezcla, hasta el punto de inyección establecido. Después de la inyección la mezcla de resina empieza a expandirse.

EJECUCIÓN

La ejecución de las intervenciones de inyección y de todos los trabajos accesorios tiene lugar exclusivamente bajo la dirección de personal cualificado Uretek.

Perforación

Gracias a un procedimiento de perforación rotativa, las perforaciones ejecutadas a través de la cimentación avanzan en el terreno hasta la profundidad máxima de colocación de los conductos de inyección. El esquema de perforación se elige en función de las cargas que se hallan por arriba de la cimentación y de sus dimensiones. Normalmente se procede inyectando la mezcla en tres niveles totales.

Preparación del material de inyección

Los dos componentes de la mezcla para inyección se conservan en recipientes separados en un camión equipado y no requieren ninguna preparación.

Pompaje y distribución

Los dos componentes, introducidos en conductos separados, se inflan a baja presión hasta la cabeza de inyección. La mezcla de los dos componentes y la inyección de la misma en el terreno tiene lugar solamente al accionar el mando que se halla en la empuñadura de pistola en la cabeza de inyección. No se necesita ningún mecanismo de reglaje de la velocidad de la pompa ya que la expansión en el punto de inyección no tiene lugar por efecto de la presión de inyección sino por la fuerza de expansión de la resina mezclada.

Inyección / proceso de inyección

La inyección tiene lugar a través de tubos de acero, sin válvula, insertados en agujeros oblicuos temporáneos. Para evitar el afloramiento de la mezcla, se inyecta una pequeña cantidad de mezcla de resina antes del comienzo del proceso de inyección para sellar el área circostante el tubo de inyección. Después de unos instantes de espera empieza el proceso de inyección. Accionando la empuñadura de la pistola sobre la cabeza de inyección la mezcla de resina se encanala a baja presión a través del tubo de acero hasta el punto de inyección. En cuanto salga del tubo, la resina empieza a expandirse desarrollando una fuerza de expansión que puede llegar hasta 10.000 kPa. Esta presión de expansión se transmite directamente al terreno y determina:

- En caso de terrenos granulares, la total permeación y el relleno de la matriz del terreno con consiguiente formación de un conglomerado monolítico.
- En caso de terrenos de estructura cohesiva, la compactación del terreno mediante la formación de un espeso retículo de lamas.

La elevada fuerza de expansión provoca además de la compactación del terreno de cimentación también un principio de levantamiento de la cimentación. Procediendo según un esquema de rejilla, las inyecciones debajo de la cimentación consienten obtener un levantamiento controlado.

Al final de la inyección los tubos quedan en el terreno. En caso de una ejecución en más niveles, por primero se inyecterà el nivel superior y después se procede con el siguiente una vez endurecida la resina.

En caso de inyecciones finalizadas a intervenciones de levantamiento, a menudo los asentamientos debidos a la consolidación de los terrenos coesivo son inevitables; sin embargo estos asentamientos se pueden compensar mediante otras inyecciones.

Monitoración del edificio, comprobación y control

Durante las operaciones de inyección, el consumo de mezcla se mide en cada punto de inyección y se compara con el consumo nominal del proyecto. Durante las operaciones de inyección se miden también los movimientos de la estructura con la ayuda de niveles láser apropiados que permiten regular la cantidad de producto.

B) ENSAYOS E INVESTIGACIONES

Hasta hoy el producto Uretek Geoplus® ha sido sometido ya a una serie de investigaciones. Sigue una recapitulación de los estudios y de los ensayos conducidos en conformidad con la metodología prevista por la norma austriaca ÖNORM B 4454. Por eso hay que distinguir entre test de principio y test de calidad. Los test de principio sirven para establecer, en general, si el producto es idóneo a la inyección en el terreno, con el objetivo de conseguir el mejoramiento del fondo y el levantamiento de la cimentación. Los test de calidad aspiran, en cambio, a comprobar si las intervenciones de inyección han alcanzado el objetivo para el cual el producto se ha utilizado.

TEST DE PRINCIPIO

Los ensayos que se van a presentar han sido conducidos en la Universidad de Padua, Departamento de Geotécnica, y en el Instituto de ensayos IFB Gauer en Alemania: estos ensayos describen el comportamiento básico del producto Uretek Geoplus®.

Propiedades mecánicas de la resina Uretek Geoplus®

- **Resistencia a la compresión monoaxial**

La resistencia a la compresión monoaxial ha sido determinada sobre pruebas de resina expandida y polimerizada de forma cúbica. Las muestras, con un lado de 50 mm, presentaban un peso de volumen entre 0,5 kN/m³ y 3,3 kN/m³. Han sido sometidas a ensayo 5 pruebas por cada peso de volumen investigado.

En función del peso de volumen de las pruebas, el material resulta tener una resistencia a la compresión incluida entre 0,2 y 6,0 MPa, ver figura 1. Los resultados obtenidos no se refieren a la resistencia de ruptura ya que el ensayo no ha determinado la ruptura de las pruebas, sino una gran deformación horizontal. Después de descargar, casi todas las maestra han adquirido la geometría originaria. Las deformaciones verticales medidas estaban incluidas entre $\epsilon = 3,5\% - 7\%$.

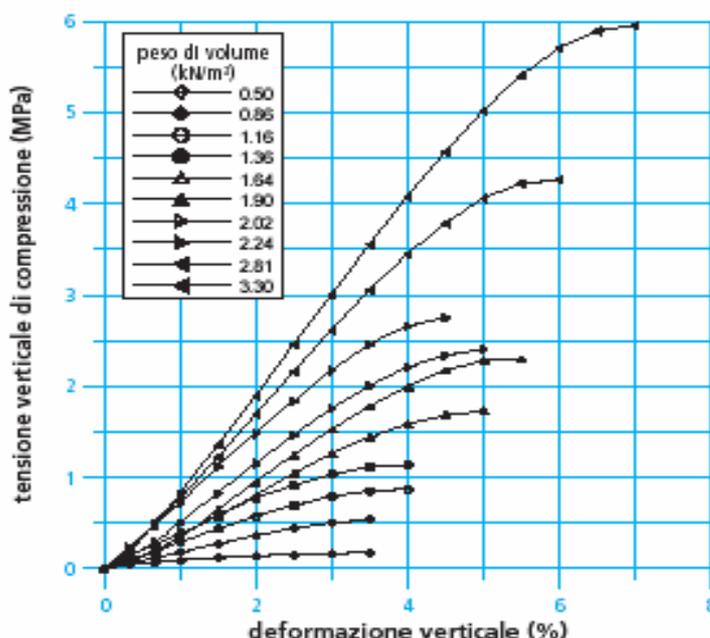


Figura 1, resultados de los ensayos de resistencia a la compresión monoaxial

Los valores de resistencia a la compresión monoaxial determinados sobre pruebas de elevado peso de volumen son claramente superiores a los de los terrenos naturales.

De las curvas de deformación por compresión, se han calculado los módulos de elasticidad correspondientes a tres deformaciones (0,33; 0,67 y 1%). Los resultados, incluidos entre 15 y 85 MPa, son claramente superiores a los valores de los terrenos granulares no cohesivos o cohesivos, de blandos a compactos.

- **Resistencia a la tracción monoaxial**

Para las actuales aplicaciones del producto la resistencia a la tracción tiene relevancia relativa: con respecto a los terrenos naturales la resina polimerizada posee una resistencia a la tracción igual a la resistencia a la compresión. El ensayo de tracción ha sido conducido sobre muestras de sección transversal reducida (25 mm). Los valores de resistencia a la tracción determinados para pesos de volumen de 0,7 a 5,0 kN/m³ estaban incluidos en el intervalo de valores 0,5÷8,0 MPa.

- **Comportamiento deformativo**

En el Instituto IFB Gauer se ha estudiado la curva fuerza-deformación de muestra de resina Uretek Geoplus® expandida y endurecida, caracterizadas por pesos de volumen diferentes.

En los ensayos de compresión edométrica ha sido determinado el comportamiento deformativo de muestra con pesos de volumen incluido entre 1 y 3 kN/m³. Durante los ensayos ha sido posible delimitar claramente el campo de deformación elástico-lineal de el campo plástico y determinar las así llamadas máximas tensiones sostenibles, bajo cuya acción no suceden todavía deformaciones plásticas. Además se han podido calcular los módulos de elasticidad válidos para el campo elástico. En la tabla 1 están los resultados correspondientes a los tres pesos de volumen.

Tabella 1, recapitulación de los resultados de los ensayos

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

Figura 1

- **Características de escurrimiento bajo carga dinámica**

Siempre en el Instituto de ensayos IFB Gauer se han conducidos ensayos de compresión triaxial para la determinación de las características de escurrimiento de la muestras con pesos de volumen diferentes bajo carga dinámica. La carga dinámica simula el pasaje de vehículos pesados de más ejes. Los ensayos han sido sometidos a 20.000 ciclos de carga de diferentes amplitudes de presión (0,5; 0,7 y 0,9 N/mm²) y se ha medido la deformación.

Como previsible, las muestras con peso de volumen reducido igual a 100 kg/m³ hacen registrar los valores de deformación más altos (0,7 mm) a la máxima amplitud de presión. A la misma amplitud, pero con un peso de volumen de 200 kg/m³, la deformación se reduce ya a 0,2 mm. Las deformaciones son atribuibles, por la mayoría, a una consolidación inicial de la muestra: entonces los valores de deformación viscosa aparecen irrelevantes.

Propiedades químicas - Toxicidad

- **Análisis de los eluados**

Para la investigación de las características de derrubio, han sido conducidas análisis de los eluados en unos carotajes y muestra de resina Uretek Geoplus® expandida y polimerizada en el terreno. Al mismo tiempo se ha estudiado la eluibilidad del terreno natural.

Los resultados de los ensayos de elución evidencian diferencias mínimas entre la muestra de referencia (terreno natural) y las muestra de resina. Por lo que se refiere al producto Uretek Geoplus® no se registra ninguna razón fundamental de preocupación.

- **Determinación de la ecotoxicidad**

La determinación de la ecotoxicidad de Uretek Geoplus® ha sido conducida en muestras de resina expandida y endurecida en el terreno. En el ámbito de la investigación se han valorado la inhibición del crecimiento de las plantas, la toxicidad sobre los lombrices de tierra y la determinación de la inhibición de la emisión luminosa en las bacterias (test sobre bacterias luminescentes).

En base a los resultados, el producto no resulta clasificable como tóxico o nocivo y en consecuencia no está sometido a la indentificación R 54 (tóxico para la flora).

ENSAYO DE IDONEIDAD

La idoneidad del material de inyección para el mejoramiento de la capacidad de sustentación del fondo tiene que estar demostrada a través de ensayos de compresión en gran escala, ver parte 2.

PARTE 2: ENSAYOS DE INYECCIÓN EN GRAN ESCALA

Notas generales – Estructuración de los ensayos

En de 2009 han sido conducidos unos ensayos de inyección en gran escala con el producto Uretek Geoplus® en el terreno de AIT.

Finalidad de los estudios era demostrar la eficacia del material de inyección a través de ensayos geotécnicos de tipo convencional. En el ámbito de la investigación se preveían indagaciones con el penetrómetro ligero DPL, mediciones del contenido de agua con sonda isotópica, la determinación del módulo de deformación dinámica con placa de carga dinámica; además de ensayos de carga con placa circular (DN 600 mm).

Las pruebas han sido conducidas en tres diferentes tipos de terrenos naturales, sin inyección (terreno de referencia) y con inyección. De la comparación de los resultados obtenidos con y sin inyección se ha definido la eficacia o la acción mejoradora de la mezcla por inyección sobre el terreno.

Todos los ensayos han sido conducidos en presencia de condiciones de contorno bien definidas y reproducibles (densidad en seco, contenido de agua, grado de compactación), para asegurar la comparabilidad de los resultados.

Como sustratos naturales se han utilizado un terreno de estructura no cohesiva (piedra calcárea de Leitha) y dos terrenos coesivosw (tegel e löss).

Los ensayos de inyección han sido conducidos en tres contenedores cilíndricos rellenos con los tres terrenos naturales.

En cada contenedor ha sido introducido un volumen de terreno de casi 2,4 m³: cada terreno ha sido introducido en el contenedor para la prueba de referencia (terreno no inyectado) y la prueba de inyección en condiciones casi iguales (densidad y contenido de agua).

En el ámbito de la prueba de carga, sobre los contenedores ha sido colocado, de manera alternada, un elemento portante constituido por dos soportes de acero y en forma de “I”, unidos el uno al otro con barras de acero. El material, introducido en los contenedores, ha sido sometido a una carga obtenida mediante una placa de carga con diámetro de 60 cm completa de cilindro hidráulico y prensa. El asentamiento de la placa ha sido registrado con la ayuda de cuatro comparadores centesimales. En la figura 2 se ilustra el mecanismo de ensayo, las figuras 3 y 4 muestran ulteriores detalles.

Ventaja de este mecanismo de ensayo

- Condiciones de contorno definidas con claridad.
- Terreno omogéneo con parámetros claramente definibles (densidad en seco, contenido de agua).
- Posibilidad de evaluar visualmente todo el volumen mejorado.
- Investigación paralela de diferentes tipos de terrenos en un único sitio (tres contenedores uno al lado de otro con diferentes tipos de terreno).

Finalidad de los ensayos:

- Determinación de los parámetros geotécnicos básicos de los terrenos inyectados con la ayuda de metodos de investigación convencionales (sondeos, determinación de la densidad)
- Determinación de las curvas de hundimiento / tiempo por diferentes cargas aplicadas.
- Comparación del comportamiento deformativo de los terrenos inyectados y no inyectados en presencia de condiciones de contorno definidas y con el mismo procedimeinto de carga.
- Determinación y comparación del módulo de deformación (E_v) de los terrenos inyectados y no inyectados.

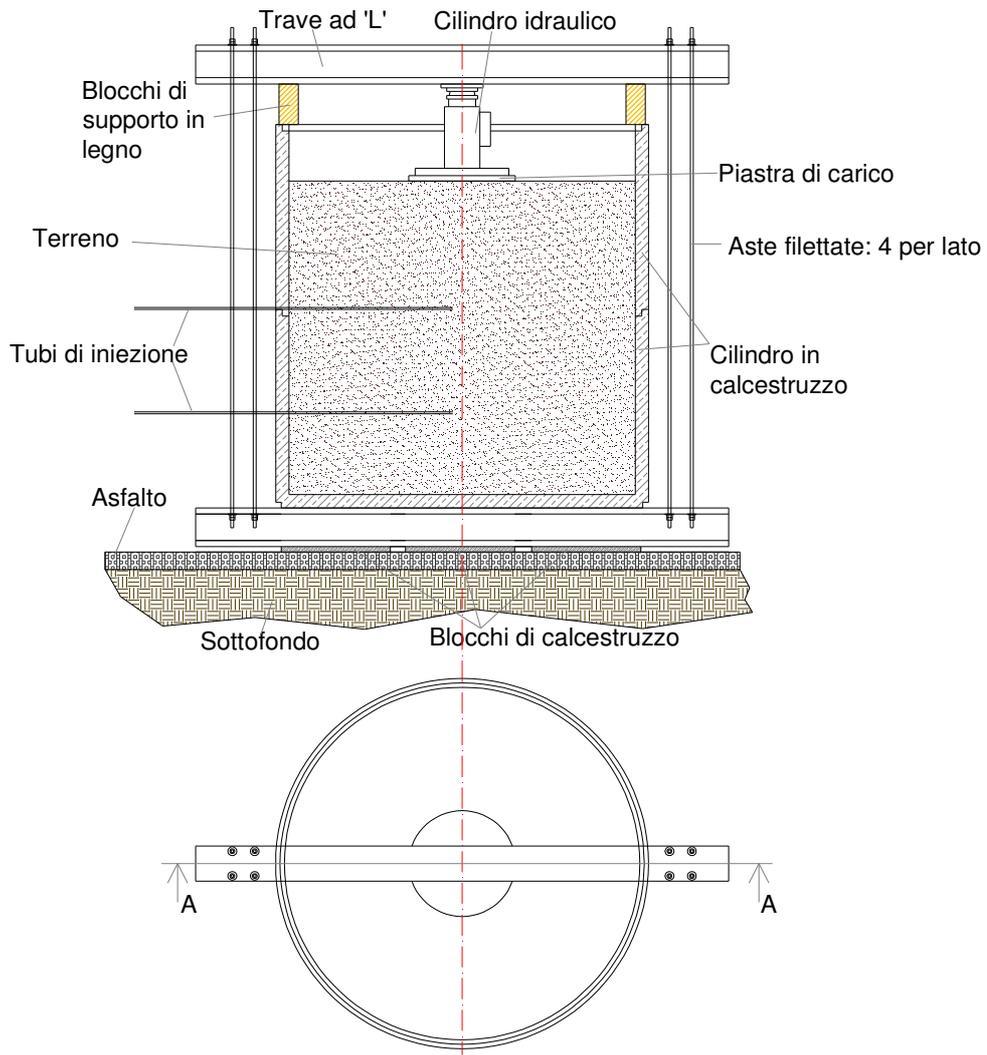


Figura 2, Esquema del dispositivo de ensayo



Figura 3, Placa de carga con elementos portantes



Figura 4, Cilindro hidráulico y placa de carga con dispositivos comparadores

Resultados y conclusiones de las investigaciones geotécnica

Siguen los resultados de los ensayos geotécnicos conducidos y las conclusiones deducibles por las tres tipologías de terrenos analizados.

Terreno de estructura no cohesiva – piedra calcárea de Leitha

- Ensayo de carga

La piedra calcárea de Leitha inyectada, nombrada Geoplus® en los siguientes esquemas, se ha demostrado resistente a la carga máxima de proyecto igual a 500 kN/m². En el caso del terreno no inyectado (terreno de referencia), ha sido necesario terminar la prueba a 400 kN/m² a causa de los fuertes asentamientos. El gráfico carga-deformación, representado en la figura 5, muestra con mucha claridad los asentamientos sustancialmente inferiores a los cuales está sometido el terreno inyectado con respecto al terreno de referencia. En particular los incrementos de carga hasta 200 kN/m² producen asentamientos reducidos, mientras que, en este caso, el terreno de referencia presenta valores 10 veces mayores.

El ciclo de descarga a 300 kN/m² evidencia en ambos casos un curso extremadamente plano, o sea se trata de deformaciones plásticas de la entera estructura granular. No parece que haya ninguna indicación de una compresión y descompresión elástica de la resina expandida.

Gráfico de carga-corrimento
Carga [kN/m²]

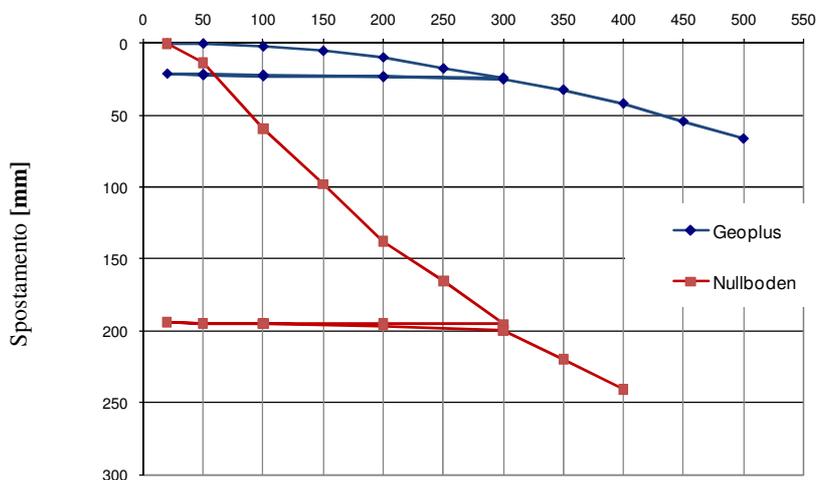
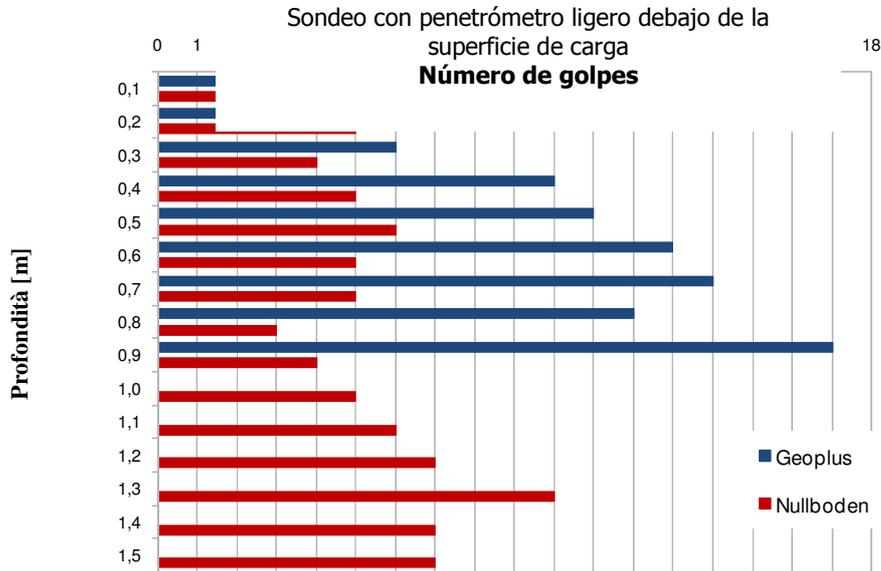


Figura 5, gráfico carga-corrimento de la piedra calcárea de Leitha inyectada y no inyectada

- Ensayos penetrométricos

Después de las pruebas de carga, han sido ejecutados unos sondeos con penetrómetro ligero directamente debajo de la placa de carga. Los resultados de las pruebas en el terreno inyectado (Geoplus®) y en terreno de referencia están ilustrados en la figura 6. Por los primeros 30 cm no se evidencia ninguna diferencia sustancial dado que los dos terrenos resultan igualmente compactados por efecto de la carga. Sólo por debajo, el sondeo

en el terreno inyectado hace registrar un claro aumento de la frecuencia de los golpes por cada 10 cm de penetración. A una profundidad de 0,9 m, la prueba penetrométrica en el terreno inyectado ha sido suspendida ya que se ha alcanzado el rechazo de parte de los instrumentos a causa de la presencia de una roca.



6, evaluación del sondeo con penetrómetro ligero en la piedra calcárea de Leitha

- Ensayo de carga dinámica sobre placa

Después de las pruebas de carga, con la placa dinámica han sido ejecutadas también las mediciones del módulo de deformación dinámica en el área subyacente la placa de carga y en tres puntos en el radio de casi 1 m. Los resultados de las mediciones han sido recopilados en la Tabla 2. El punto de medición 1 se halla en el área del terreno compactado por efecto de las pruebas de carga, los otros tres puntos de medición han sido distribuidos en su proximidad. El parámetro Evd del terreno inyectado es de poco superior al parámetro del terreno de referencia.

Tabla 2, resultados de los ensayos de carga dinámica sobre placa

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

- Evaluación visual del área de inyección

Para entender de forma mejor la expansión y el comportamiento de la mezcla inyectada en el terreno, al acabar las pruebas el área de inyección ha sido excavada. Dado que los **anillos** de hormigón tienen un diámetro de dos metros, las excavaciones efectuadas con la ayuda de un excavador, resultaron muy difíciles. También utilizando la pala más pequeña, las posibilidades de excavación eran muy limitadas. Por eso se ha utilizado más la excavación manual.

En el caso de la piedra calcárea de Leitha de estructura granular, los huecos vacíos han sido impregnados por la mezcla con la consiguiente formación de un conglomerado monolítico de notables propiedades mecánicas, ver figura 7. La expansión de la resina ha tenido lugar de manera uniforme y

en una superficie amplia, figura 9. El resultado ha sido una buena agregación de la masa tratada. Directamente en correspondencia del punto de inyección, en el centro del tubo, se ha formado un agregado de resina caracterizada por una resistencia excelente, figura 8. En la superficie no se ha evidenciado ningún derrame.



Figura 7, mezcla de grava y resina Uretek Geoplus®



Figura 8, área circustante el punto de inyección



Figura 9, expansión de la resina en la grava

Terreno cohesivo - Tegel

- Ensayos de carga

El tegel inyectado, nombrado Geoplus® en los esquemas siguientes, se ha demostrado resistente a la carga máxima de proyecto igual a 400 kN/m^2 , ver figura 10. En el caso del terreno no inyectado (terreno de referencia), ha sido necesario terminar la prueba a 200 kN/m^2 por los fuertes asentamientos, figura 10. El gráfico carga- corrimiento que representa el terreno de referencia hay que considerarlo como estado de ruptura. El efecto de la inyección sobre el comportamiento de asentamiento bajo carga puede definirse excelente. Por lo que se refiere a los incrementos de carga hasta 200 kN/m^2 , los asentamientos resultan reducidos de casi 10 veces. Los sucesivos incrementos de carga evidencian un aumento un poco más superior de los asentamientos, sin determinar, por eso, condiciones propicias a la ruptura del terreno.

El ciclo de descarga a 300 kN/m^2 del terreno inyectado evidencia un curso muy plano, o sea se trata de deformaciones plásticas de la entera estructura granular. No parece que haya ninguna indicación de una compresión y descompresión elástica de la resina expandida.

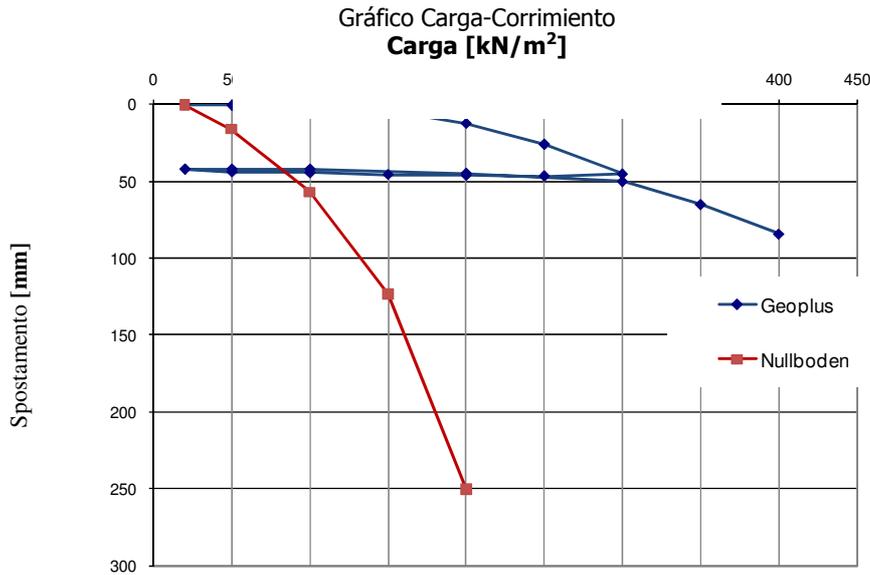


Figura 10, gráfico carga-corrimento tegel

- Ensayos penetrométricos

Después de las pruebas de carga, han sido ejecutados algunos sondeo con penetrómetro ligero directamente por debajo de la placa de carga. Los resultados de las pruebas en el terreno inyectado (Geoplus®) y en el terreno de referencia se ilustran en la figura 11. Aquí se denota claramente un aumento del número de los golpes en el terreno inyectado. En particular en el área incluida entre 0 y 0,9 m, el terreno inyectado muestra casi un aumento del 100% de los números de golpes por un avance de 10 cm de penetración.

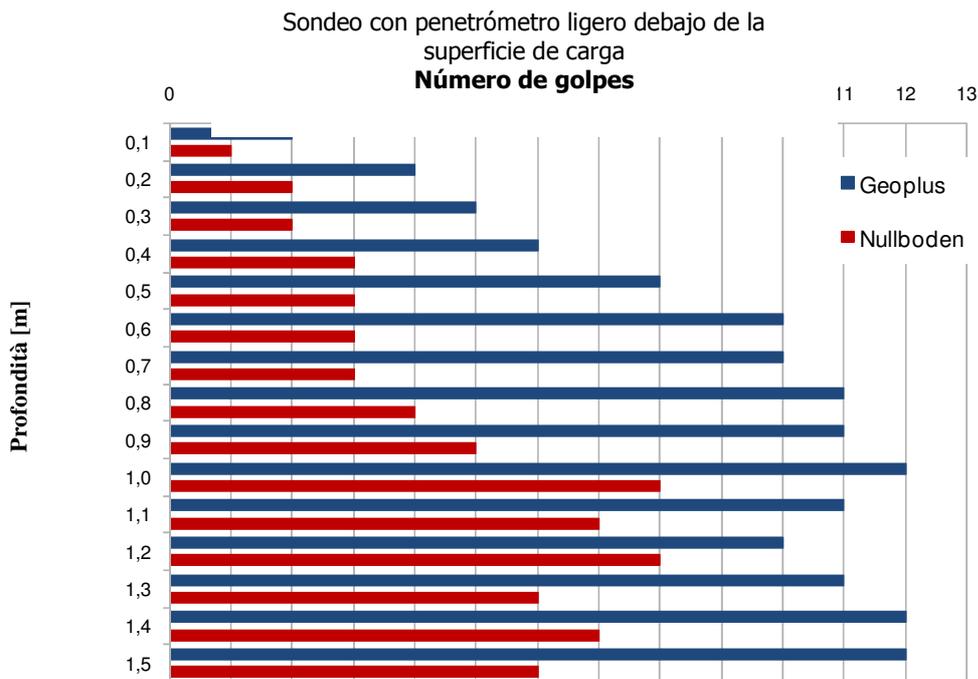


Figura 11, evaluación de los sondeos con penetrómetro ligero en el tegel

- Ensayo de carga dinámica sobre placa

Después de la prueba de carga, con la placa dinámica han sido ejecutadas también mediciones del módulo de deformación dinámico en el área debajo de la placa de carga y en tres puntos en el radio de 1m. Los resultados de las mediciones han sido recopilados en la Tabla 3. El punto de medición 1 se halla en el área del terreno compactado por efecto de las pruebas de carga, los otros tres puntos de medición están distribuidos en sus alrededores. El parámetro Evd del terreno inyectado es claramente superior al parámetro del terreno de referencia. Como previsto, el punto de medición directamente debajo de la carga, evidencia en ambos terrenos el valor de Evd más alto, pero, en el terreno inyectado este valor es 3 veces mayor. Este dato, junto a los resultados del sondeo penetrométrico, demuestra el efecto de mejoramiento en el terreno, también en la faja más alta, hasta 1m debajo de la superficie.

Tabla 3, resultados de los ensayos de carga dinámica sobre placa de tegel

Punto de medición	Geoplus®	Terreno de referencia
	Evd	Evd
1	14,67	4,75
2	11,13	3,60
3	9,98	3,70
4	11,50	3,50

- Evaluación visual del área de inyección

En el tegel, el material de inyección ha formado un espeso retículo de lamas. Gracias a esta estructura lamelar tienen lugar, de un lado una compactación localizada del terreno cerca de las lamas y del otro el mismo se fortalece por efecto del retículo. Las figuras de 12 a 14 muestran la estructura lamelar. En superficie no se ha observado ningún derrame de mezcla.



Figura 12, expansión del material de inyección en el tegel



Figura 13, expansión del material de inyección en el tegel



Figura 14, expansión del material de inyección en el tegel

Terreno cohesivo - Löss

- Ensayos de carga

El löss inyectado, denominado Geoplus® en los esquemas siguientes, no ha sujetado la carga máxima del proyecto igual a 400 kN/m². A 200 kN/m² ha sido necesario interrumpir el ensayo de carga a causa de los fuertes asentamientos, figura 15. En el terreno inyectado (terreno de referencia) han sucedido fuertes asentamientos ya al primer aumento de carga. El terreno de referencia es así clasificable como no resistente. Así que, el efecto de la inyección sobre el comportamiento de asentamiento bajo carga, puede ser definido muy bueno. Por aumentos de carga hasta 100 kN/m², los asentamientos resultan reducidos de casi 10 veces. Los siguientes aumentos de carga evidencian un fuerte aumento de los asentamientos. De todas formas se puede reconocer claramente un aumento de la capacidad portante por efecto de la inyección.

Gráfico Carga-Corrimiento
Carga [kN/m²]

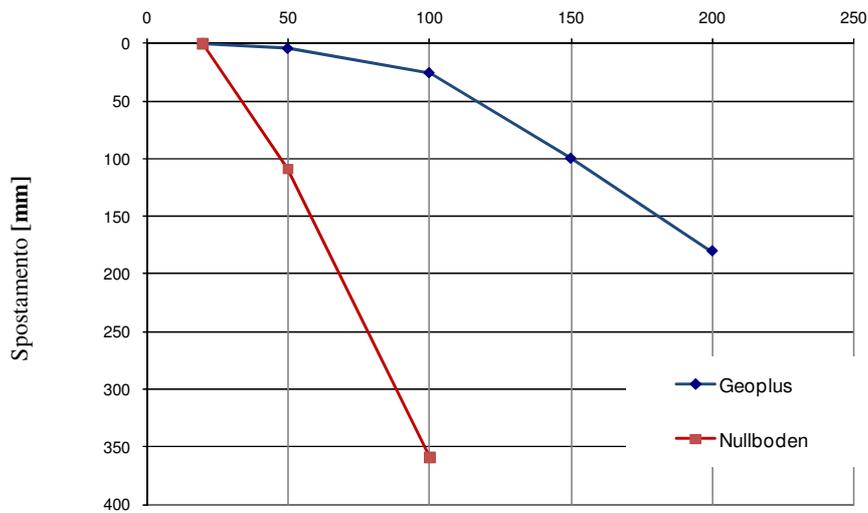


Figura 15, gráfico carga-corrimento - löss

- Ensayos penetrométricos

Después de los ensayos de carga han sido ejecutados sondeos con penetrómetro ligero directamente debajo de la placa de carga. Los resultados de las pruebas en el terreno inyectado (Geoplus®) y en el terreno de referencia se ilustran en la figura 16. Aquí es verificable un aumento del número de golpes en el terreno inyectado. Hasta una profundidad de 0,5 m, la compactación que resulta de las pruebas de carga es reconocible en los dos terrenos. Por debajo el terreno de referencia presenta una compactibilidad muy baja, mientras que el terreno inyectado evidencia un aumento del número de golpes N_{10} igual a tres/cuatro veces los valores iniciales.

Sondeo con penetrómetro ligero debajo de la superficie de carga
Número de golpes

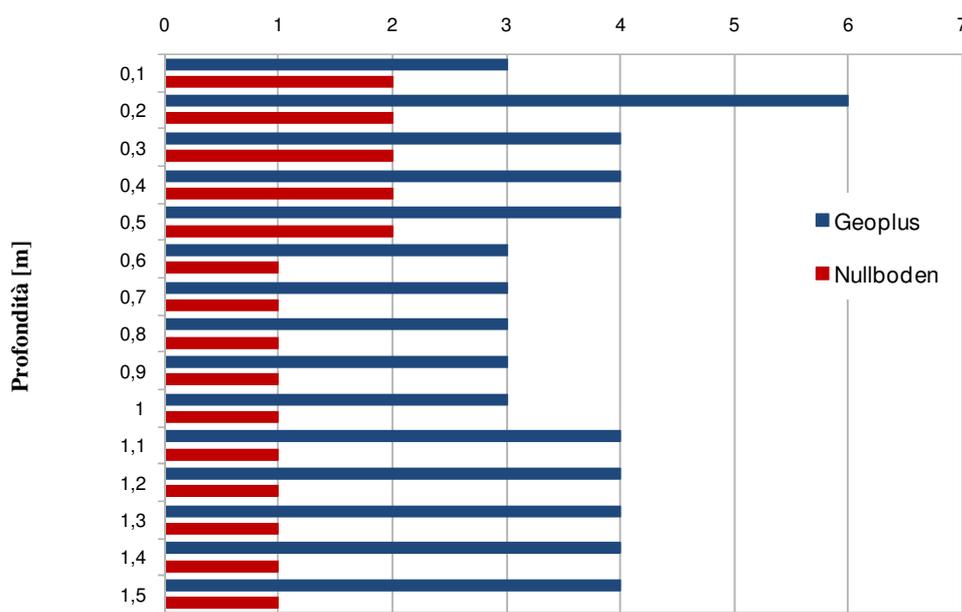


Figura 16, evaluación del sondeo con penetrómetro ligero en el löss

- Ensayo de carga dinámica sobre placa

Después del ensayo de carga, con la placa dinámica han sido ejecutadas también mediciones del módulo de deformación dinámica en el área debajo de la placa de carga y en tres puntos en el radio de casi 1 m. Los resultados de las mediciones han sido recopilados en la Tabla 4. El punto de medición 1 se halla en el área del terreno compactado por efecto de los ensayos de carga, los otros tres puntos de medición están distribuidos en sus alrededores. El parámetro Evd del terreno inyectado es de poco superior al parámetro del terreno de referencia.

Tabla 4, resultados de los ensayos de carga dinámicas sobre placa sobre el löss

Punto de medición	Geoplus®	Terreno de referencia
	Evd	Evd
1	13,35	13,31
2	6,45	4,52
3	5,77	5,04
4	6,10	5,08

- Evaluación visual del área de inyección

A causa de la compactabilidad muy baja del löss, la resina saliendo del tubo de inyección, al principio, ha ocupado un volum casi esférico, ver figura 17. Durante la siguiente expansión de la resina se han formado espesas lamas dirigidas hacia la superficie. Después el materia de inyección se ha salido a la superficie. En consideración de la elevada fuerza de expansión, la resina ha podido comprimir el terreno

granular y ha subido hacia la superficie a causa de la baja densidad. El fenómeno se puede reconocer claramente en las figuras 18 y 19.



Figura 17, expansión de la resina en el área circostante el punto de inyección



Figura 18, expansión de la resina en el área circustante el punto de inyección

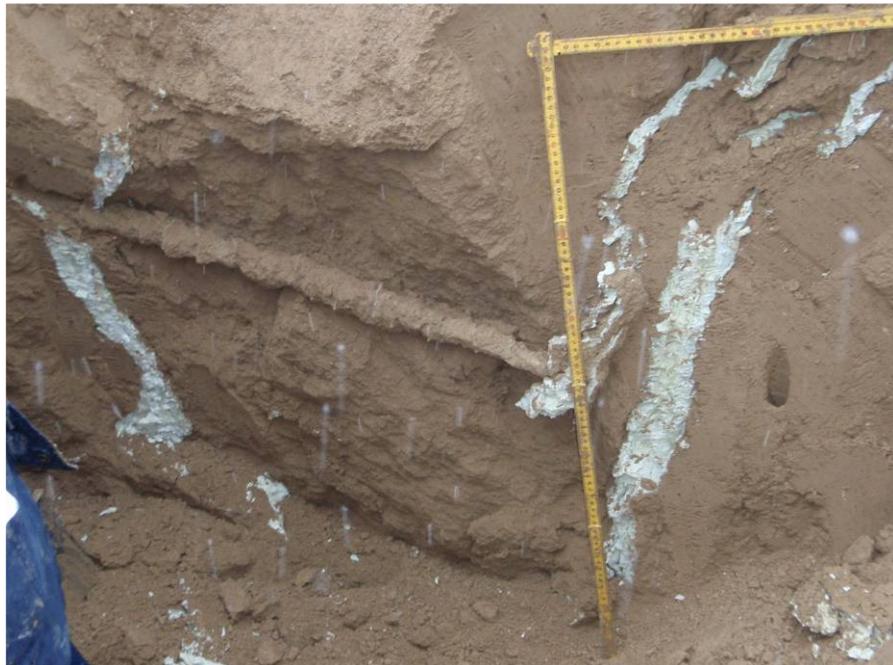


Figura 19, expansión de la resina en el área circostante el punto de inyección

Recapitulación e interpretación de los ensayos de inyección en gran escala

Función de las investigaciones era demostrar el efecto positivo de las inyecciones de resina expandente Uretek Geoplus® sobre la capacidad portante de los terrenos naturales de varia estructura utilizando métodos convencionales de investigación geotécnica. El ámbito de investigación establecido incluía sondeos con el penetrómetro ligero DPL, mediciones de la densidad y del contenido de agua con sonda isotópica, la determinación del módulo de deformación dinámica con placa de carga dinámica, y además la conducción de ensayos de carga con placa circular (DN 600 mm).

Como sustratos naturales han sido utilizados un terreno de estructura no cohesiva (piedra calcárea de Leitha) y dos terrenos cohesivos (tegel y löss). Estos terrenos granulares son muy difundidos en Austria y, por lo tanto, pueden ser considerados representativos.

Todas las pruebas han sido conducidas en presencia de condiciones de contorno bien definidas y reproducibles (densidad en seco, contenido de agua, grado de compactación).

Los resultados obtenidos de los estudios puede resumir como sigue:

- Los resultados de los ensayos de carga evidencian con claridad el efecto positivo del material de inyección Uretek Geoplus® expandido y polimerizado sobre el comportamiento de deformación y también sobre la capacidad portante de los tipos de suelo objetos de la investigación.
- En el caso de los terrenos no cohesivos (piedra calcárea de Leitha), con la inyección se ha obtenido una reducción de los asentamientos inducidos por la carga simulados sobre la cimentación. La curva de asentamiento bajo carga resulta decididamente aplastada. El ciclo de descarga muestra de la misma manera un curso horizontal: se trata de deformaciones plásticas. No hay indicaciones de una compresión y descompresión elástica de la resina expandida. La observación del área de inyección revela que el material ha completamente impregnado los vacíos, dando origen a una estructura del terreno que presenta las características de un conglomerado. La expansión de la resina ha tenido lugar de manera uniforme sobre una superficie muy amplia.
- También en el caso de terrenos de estructura cohesiva (tegel, löss), la inyección ha determinado una clara reducción de los asentamientos inducidos por el ensayo de carga. Además también la capacidad portante resulta decididamente mejorada. Eso parece evidente si se observan las curvas de asentamiento bajo carga del tegel. El tegel no inyectado alcanza su capacidad portante límite ya a casi 200 kN/m², mientras el terreno inyectado con resina Uretek Geoplus® puede sujetar la carga máxima de 400 kN/m². La resina ha formado en el tegel un espeso retículo de lamas: es gracias a esta estructura lamelar que tienen lugar de un lado una compactación localizada del terreno en proximidad de las lamas y del otro su el mismo se fortalece por efecto del retículo.
- A causa de su compactabilidad muy baja el terreno de löss analizado representa un caso aparte. En el terreno no inyectado, la capacidad portante límite se alcanza ya desde los primeros ciclos de carga. Después de la inyección resulta, en cambio, aplicable una carga hasta 100 kN/m² con asentamientos todavía aceptables: esto significa un claro aumento de la capacidad portante y al mismo tiempo resulta una reducción de los asentamientos.