

TEST D'INJECTION AVEC LA RÉSINE URETEK GEOPLUS®

Client:
Uretek Injektionstechnik GmbH

Adresse:
Mooslackengasse 17, 1190 Vienne

Auteur:
DI Richard Niederbrucker

Mars 2010

Exemplar 1
AIT-HE-0036

Index

BRÈVE INTRODUCTION	3
NOTES GÉNÉRALES	3
DOCUMENTATION TECHNIQUE URETEK GEOPLUS® - RÉCAPITULATION	3
<i>Le Principe d'injection</i>	3
<i>Caractéristiques et composition du matériel d'injection</i>	3
<i>Paramètres et critères</i>	3
<i>Aspects concernant l'environnement</i>	4
ÉTUDES D'APTITUDE SOUS FORME D'ESSAIS D'INJECTION À GRANDE ÉCHELLE	4
1. NOTES GÉNÉRALES	6
1.1 NOTES GÉNÉRALES – FIABILITÉ DE LA MÉTHODE	6
1.2 ÉTUDES ET INVESTIGATIONS EXÉCUTÉES	6
1.3 LITTÉRATURE DE RÉFÉRENCE	6
PARTIE 1 : DOCUMENTATION TECHNIQUE URETEK GEOPLUS®	7
A) DOCUMENTATION TECHNIQUE	7
MATÉRIEL D'INJECTION	7
<i>Caractéristiques et composition</i>	7
<i>Aspects concernant l'environnement</i>	7
<i>Paramètres et critères</i>	7
LE PRINCIPE D'INJECTION ET LE DÉROULEMENT	8
<i>Principe d'injection</i>	8
<i>Procédé d'injection</i>	8
<i>Injection du produit</i>	8
EXÉCUTION.....	8
<i>Perforation</i>	8
<i>Préparation du matériel d'injection</i>	8
<i>Pompage et distribution</i>	9
<i>Injection/Procès d'injection</i>	9
<i>Analyse du bâtiment, vérification et contrôle</i>	9
B) TESTS ET RECHERCHES.....	10
TEST D'APTITUDE	10
<i>Propriétés mécaniques de la résine Uretek Geoplus®</i>	10
<i>Résistance à la compression uniaxial</i>	10
<i>Résistance à la traction uniaxiale</i>	11
<i>Comportement de déformation</i>	11
<i>Caractéristiques de déformation sous charge dynamique</i>	11
<i>Propriétés chimiques – Toxicité</i>	12
<i>Analyse des éluats</i>	12
<i>Détermination de l'écotoxicité</i>	12
TEST D'APTITUDE	12
PARTIE 2 : ESSAIS D'INJECTION À GRANDE ÉCHELLE	13
NOTES GÉNÉRALES – STRUCTURATION DES ÉPREUVES	13
RESULTATS ET CONCLUSIONS DES RECHERCHES GEOTECHNIQUES	15
<i>Terrain de nature non-cohésif – calcaire de Leitha</i>	15
<i>Terrain cohésif – Tegel</i>	19
<i>Terrain cohésif – Löss</i>	23
RÉCAPITULATION ET INTERPRÉTATION DES TESTS D'INJECTION À GRANDE ÉCHELLE.....	27

Brève Introduction

Notes Générales

La méthode Deep Injections® pour la consolidation et l'augmentation de la capacité portante du terrain situé en-dessous des fondations avec l'aide de résines expansibles a été développée et brevetée par la société Uretek srl. Le matériel d'injection Uretek Geoplus® est déjà utilisé dans de nombreux pays d'Europe.

En Autriche, cette méthode trouve encore peu d'application, car les expérimentations à grande échelle sont peu nombreuses et le cadre normatif et juridique est encore peu clair.

L' Austrian Institute of technology GmbH a donc été chargé par Uretek Injektionstechnik GmbH de rédiger un dossier technique basé sur la documentation existante et sur les résultats des essais conduits à grande échelle, ainsi que des études générales d'aptitude sur la résine Uretek Geoplus® utilisée.

Documentation technique Uretek Geoplus® - Récapitulation

Le Principe d'injection

Le produit et la méthode sont définis d'injection avec compression du terrain de fondation (injection de compactage, injection de rupture hydraulique). Grâce à la considérable force d'expansion de la résine injectée, le terrain instable dans les volumes environnants résultera compact.

Caractéristiques et composition du matériel d'injection

Le matériel d'injection Uretek Geoplus® consiste en un système de polyuréthane bicomposant, composé de polyols et d'isocyanates. Le produit, qui est injecté dans le terrain en forme de solution, polymérise et augmente son volume. Les deux composants de système sont définis Geoplus® A et Geoplus® B.

Paramètres et critères

Pression d'expansion : la pression d'expansion du mélange biphasé équivaut à 10.000 kPa et diminue à mesure qu'augmente le degré d'expansion, jusqu'à atteindre une situation d'équilibre dans le terrain.

Degré d'expansion : le degré d'expansion du produit Uretek Geoplus®, en fonction de la résistance du terrain, est compris entre 200 et 2000% du volume initial injecté.

Résistance mécanique : la résistance mécanique de la résine dilatée et durcie varie selon le degré d'expansion. Pour des poids compris entre 0,5 et 3,3 kN/m³ on a déterminé des valeurs de résistance de 0,2 à 6,0 MPa.

Stabilité dans le temps : Uretek fournit une garantie de 10 ans sur les interventions d'injection exécutées. Plusieurs années d'expérience démontrent aussi que le matériel injecté résiste bien au-delà de ces 10 ans.

Poids spécifique : le poids spécifique de la résine injectée dépend du degré d'expansion et il est compris entre 150 et 300 kg/m³ dans le terrain.

Perméabilité à l'eau : la résine dilatée et durcie possède un coefficient de perméabilité égal à $K_f=10^{-8}$ m/s. Cette valeur correspond environ à la perméabilité d'un terrain argileux. Dans des terrains de nature non cohésif, la résine réduit la perméabilité et empêche l'apparition de phénomènes de suffusion et d'érosion.

Aspects concernant l'environnement

Sur des éprouvettes de résine de polyuréthane polymérisée ont été conduites des analyses toxicologiques sur le terrain. Le produit ne peut pas être classé comme toxique ou nuisible et par conséquent ne peut pas être classé comme sujet à l'identification R54 (toxique pour la flore).

Par ailleurs, des essais d'érosion ont été effectués sur des éprouvettes de terrain injecté. Les résultats n'ont mis en évidence aucune contre-indication.

Études d'aptitude sous forme d'essais d'injection à grande échelle

Le but des études était de démontrer l'effet positif du mélange pour injection Uretek Geoplus® sur la capacité portante de terrains naturels de différente nature en utilisant des méthodes de recherche géotechnique. Les recherches conduites ont prévu la réalisation d'essais pénétrométriques dynamiques avec un instrument DPL: le mesurage de la densité et du contenu d'eau avec une sonde isotopique ; la détermination du coefficient de déformation dynamique avec une plaque de charge dynamique ; ainsi que des essais de charge avec une plaque circulaire (DN 600mm).

Comme substrats naturels ont été utilisés un terrain de nature non-cohésif (du calcaire de Leitha) et deux terrains cohésifs (Tegel et Löss). Ces terrains meubles sont très répandus en Autriche et peuvent donc être considérés représentatifs.

Tous les essais ont été effectués en présence de conditions aux contours parfaitement définis et reproductibles (densité à sec, contenu d'eau, degré de compactage) pour garantir la comparaison des résultats.

Les résultats obtenus de ces études peuvent être résumés ainsi :

- Les résultats des essais de charge mettent clairement en évidence l'effet positif dérivé de l'expansion du matériel injecté sur le comportement de déformation ainsi que sur la capacité portante des typologies de terrain objet de l'investigation.
- Dans le cas de terrains non-cohésifs (calcaire de Leitha), l'injection a permis d'obtenir une nette réduction des déformations induites par la charge simulée sur les fondations. La courbe de déformation sous charge résulte nettement aplatie. Le cycle de déchargement démontre - d'une manière analogue - le développement horizontal : il s'agit donc de déformations plastiques. Il est donc possible de conclure qu'il n'y a pas de comportements déformants du matériel injecté après sa polymérisation. L'observation des volumes injectés de terrain révèle que le matériel a imprégné complètement les vides, portant à une structure de terrain qui présente les caractéristiques d'un conglomérat. L'expansion de la résine s'est produite d'une façon uniforme sur une large superficie.
- Même dans le cas de terrains de nature cohésive (tegel, löss), l'injection a déterminé une nette réduction des tassements produits par l'essai de charge. De plus, la capacité portante résulte décidément améliorée. Ceci est évident si on observe les courbes de déformation sous charge du tegel. Le tegel non injecté rejoint sa limite de capacité portante déjà à environ 200 kN/m², tandis que le terrain injecté avec la résine Geoplus® supporte une charge limite de 400 kN/m². La résine a formé dans le tegel un épais réseau de lames : grâce à cette structure lamellaire, on observe d'un côté un compactage localisé du terrain à proximité des lames et de l'autre côté sa fortification par suite du réseau.
- À cause de sa compacité réduite, le terrain de löss analysé représente un cas particulier. Dans le terrain non injecté, la capacité portante limite est atteinte dès les premiers cycles de charge. À la suite de l'injection il résulte - au contraire - qu'on peut appliquer une charge jusqu'à 100 kN/m² avec des tassements encore

acceptables : ce qui signifie une nette augmentation de la capacité portante et en même temps la réduction des tassements résultants.

1. Notes générales

1.1 Notes générales – Fiabilité de la méthode

La méthode pour la consolidation et l'augmentation de la capacité portante du terrain situé au-dessous des fondations avec l'aide de résines expansibles a été développée et brevetée par la société Uretek. Le matériel d'injection Uretek Geoplus® est déjà utilisé dans des nombreux pays d'Europe.

En Autriche, cette méthode trouve encore peu d'application, car les expérimentations à grande échelle sont peu nombreuses et le cadre normatif et juridique est encore peu clair.

L' Austrian Institute of technology GmbH a donc été chargé par Uretek Injektionstechnik GmbH de rédiger un dossier technique basé sur la documentation existante et sur les résultats des essais conduits à grande échelle, ainsi que des études générales d'aptitude sur la résine Uretek Geoplus® utilisée.

1.2 Études et investigations exécutées

Par la suite, les travaux exécutés sont divisés en deux parties :

Partie 1 : Documentation technique qui naît des investigations déjà exécutées sur le produit Uretek Geoplus® par différents organismes d'essai.

Partie 2 : Relation des essais d'injection à grande échelle exécutés avec le produit Uretek Geoplus® sur des terrains meubles de différente nature.

1.3 Littérature de référence

Pour la rédaction de la relation, on a utilisé la littérature de référence qui suit :

- Normes et directives applicables;
- Notes techniques et résultats des essais de laboratoire sur la résine expansibles de nouvelle génération Uretek Geoplus®, par Uretek en collaboration avec l'Université de Padoue;
- Analyses chimiques et toxicologiques du matériel en polyuréthane bicomposé, Geoplus® A / Geoplus® B; Institut d'hygiène du Bassin de la Ruhr;
- Résine Geoplus®, valuation hydro-hygiénique, Institut d'hygiène du Bassin de la Ruhr;
- Fiches de sécurité des produits Geoplus® A et Geoplus® B, Résine Chemie B.V.;
- Détermination des caractéristiques du produit d'éprouvettes de résine expansibles Uretek Geoplus®, iFB Gauer.

PARTIE 1 : DOCUMENTATION TECHNIQUE URETEK GEOPLUS®

La documentation technique présentée ci-dessous est conforme aux chapitres pertinents de la ÖNORM EN 12715, exécution des interventions géotechniques particulières (fondations spéciales) – injections, et fait référence aux essais mentionnés dans la ÖNORM B 4454.

A) DOCUMENTATION TECHNIQUE

MATÉRIEL D'INJECTION

Caractéristiques et composition

Le matériel d'injection Uretek Geoplus® consiste en un système polyuréthane bicomposant, composé essentiellement de polyoles et isocyanates. Le produit, qui est injecté dans le terrain sous forme de solution, polymérise en augmentant son volume. Les deux composants du système sont définis Geoplus® A et Geoplus® B.

Aspects concernant l'environnement

Sur des éprouvettes de résine de polyuréthane polymérisée ont été conduites des analyses toxicologiques sur le terrain. Le produit ne peut pas être classé comme toxique ou nuisible et par conséquent ne peut pas être classé comme sujet à l'identification R54 (toxique pour la flore).

De plus, on a fait des essais d'érosion sur des éprouvettes de terrain injecté. Les résultats n'ont mis en évidence aucune contre-indication.

Paramètres et critères

Pression d'expansion : la pression d'expansion du mélange biphasé vaut 10.000 kPa et diminue à mesure qu'augmente le degré d'expansion, jusqu'à rejoindre une situation d'équilibre dans le terrain.

Degré d'expansion : le degré d'expansion du produit Uretek Geoplus®, en fonction de la résistance du terrain, est compris entre 200 et 2000% du volume initial injecté.

Résistance mécanique : la résistance mécanique de la résine dilatée et durcie dépend du degré d'expansion. Pour des poids compris entre 0,5 et 3,3 kN/m³ on a déterminé des valeurs de résistance de 0,2 à 6,0 MPa.

Stabilité dans le temps : Uretek fournit une garantie de 10 ans sur les interventions d'injection exécutées. Plusieurs années d'expérience démontrent également que le matériel injecté résiste bien au-delà de ces dix ans.

Poids spécifique : le poids spécifique de la résine injectée dépend du degré d'expansion et il est compris entre 150 et 300 kg/m³ dans le terrain.

Perméabilité à l'eau : la résine dilatée et durcie possède un coefficient de perméabilité égal à $K_f=10^{-8}$ m/s. Cette valeur correspond environ à la perméabilité d'un terrain argileux. Dans des terrains de nature non cohésif, la résine réduit la perméabilité et empêche l'apparition de phénomènes de suffusion et d'érosion.

LE PRINCIPE D'INJECTION ET LE DÉROULEMENT

Principe d'injection

Le produit et la méthode sont définis par injection avec compression du terrain de fondation (injection de compactage, injection de rupture hydraulique). Grâce à la notable force d'expansion de la résine injectée, le terrain mouvant dans les volumes environnant résultera compact.

Procédé d'injection

Injection du produit

Le produit est injecté dans le terrain à travers des tubes d'acier. Pendant un cycle spécial de travail on fait, à travers les fondations, des trous avec un diamètre de 26 mm qui permettent de rejoindre avec précision le volume de terrain à traiter. Par la suite, dans les trous sont introduits des tubes d'acier avec un diamètre de 14 mm. La phase d'injection prévoit l'utilisation d'une tête d'injection avec une poignée à pistolet qui est introduite et reliée à l'extrémité supérieure du tube. À la tête d'injection sont reliées deux lignes séparées par les deux composants de la résine. Quand on active la poignée à pistolet, on détermine l'introduction dans le tube des deux composants préalablement mélangés et le pompage à basse pression du mélange jusqu'au point d'injection établi. Une fois injecté le mélange de résine commence à se répandre.

EXÉCUTION

L'exécution des interventions d'injection et de tous les travaux accessoires a lieu exclusivement par le personnel qualifié Uretek.

Perforation

Avec un procès de forage rotatif, les perforations exécutées à travers la fondation pénètrent dans le terrain jusqu'à la profondeur maximale de pose des conduits d'injection. Le schéma de perforation est choisi en fonction des charges situées au-dessus de fondations et de leurs dimensions. D'ordinaire, on avance avec des injections sur trois niveaux d'injection.

Préparation du matériel d'injection

Les deux composants de la résine pour injection sont conservés dans des récipients séparés dans un camion équipé pour cet usage et ils n'ont besoin d'aucune préparation.

Pompage et distribution

Les deux composants, introduits dans des tubes séparés, sont pompés à basse pression jusqu'à la tête d'injection. Seulement quand on actionne la commande présente dans la poignée a lieu le mélange des deux composants et l'injection du mélange dans le terrain. Aucun mécanisme de régulation de la vitesse de la pompe n'est nécessaire, puisque l'expansion dans le point d'injection n'arrive pas par effet de la pression d'injection mais – au contraire – par la force d'expansion de la résine mélangée.

Injection/Procès d'injection

L'injection est faite à travers des tubes d'acier, sans manchette, introduits dans les trous obliques temporaires. Pour éviter l'affleurement du mélange, une petite quantité de mélange de résine est injectée avant le début du procès d'injection; de cette façon on scelle la zone environnant le tube d'injection.

Après quelques instants d'attente, le procès d'injection commence en actionnant la poignée à pistolet sur la tête d'injection; le mélange de résine est dirigé – à basse pression – à travers un tube jusqu'au point d'injection. Dès qu'elle sort du tube, la résine commence à se dilater en développant une force d'expansion qui peut arriver jusqu' à 10.000 kPa. Cette pression d'expansion se transmet directement sur le terrain et détermine :

- Dans le cas de terrains granulaires, la totale pénétration et le remplissage du terrain avec la conséquente formation d'un conglomérat monolithique.
- Dans le cas de terrains de nature cohésive, le compactage du terrain à travers la formation d'un épais réseau de lames

La grande force d'expansion provoque – au-delà du compactage du terrain de fondation – également un commencement de soulèvement de la fondation. En avançant selon un schéma à grille, les injections au-dessous des fondations permettent d'obtenir un soulèvement contrôlé.

À la fin de l'injection, les tubes d'injection restent dans le terrain. Dans le cas d'une exécution d'injection dans plusieurs couches, on injectera la première couche supérieure et après - quand la résine s'est durcie - on procède avec la suivante.

Dans le cas d'injections pour une intervention de soulèvement, souvent les tassements -qui sont dûs à la consolidation des terrains cohésifs- sont inévitables; cependant on peut compenser ces tassements grâce à d'autres injections.

Analyse du bâtiment, vérification et contrôle

Pendant les opérations d'injection, la consommation du mélange est mesurée dans chaque point d'injection et comparée avec la consommation nominale du projet. Pendant les opérations d'injection on mesure aussi les mouvements de la structure avec l'aide de niveaux laser appropriés qui permettent de régler la quantité du produit.

B) TESTS ET RECHERCHES

Le produit Uretek Geoplus® a été déjà soumis à une série de tests et recherches. Ci-dessous une récapitulation des études et des tests conduits en conformité de la méthodologie prévue par la norme autrichienne ÖNORM B 4454. A ce propos, il faut distinguer les tests d'aptitude des tests de qualité. Les tests d'aptitude servent à établir en général si le produit est apte à l'injection dans le terrain pour obtenir l'amélioration du hourdis et le soulèvement des fondations. Les tests de qualité visent plutôt à vérifier si les interventions d'injection ont permis la réalisation des buts pour lesquels le produit est utilisé.

TEST D'APTITUDE

Les expérimentations qui sont présentées ont été conduites par l'Université de Padoue, département de géotechnique, et par l'institut de test IFB Gauer en Allemagne: elles décrivent le comportement fondamental du produit Uretek Geoplus®.

Propriétés mécaniques de la résine Uretek Geoplus®

- **Résistance à la compression uniaxial**

La résistance à la compression uniaxiale a été déterminée avec des éprouvettes de résine expansée et polymérisée de forme cubique. Les éprouvettes, avec un côté de 50mm, présentaient un poids de volume compris entre 0,5 kN/m³ et 3,3 kN/m³. On a soumis à l'épreuve 5 éprouvettes pour chaque poids de volume étudié.

En fonction du poids de volume des éprouvettes, le matériel résulte avoir une résistance à la compression comprise entre 0,2 et 6,0 MPa, voir l'illustration 1. Les résultats obtenus ne se rapportent pas à la résistance de rupture car le test n'a pas provoqué la rupture des éprouvettes mais plutôt une forte déformation horizontale. Après le déchargement, presque la totalité des éprouvettes ont repris de nouveau leur géométrie originale. Les déformations verticales mesurées étaient comprises entre $\epsilon = 3,5\% - 7\%$.

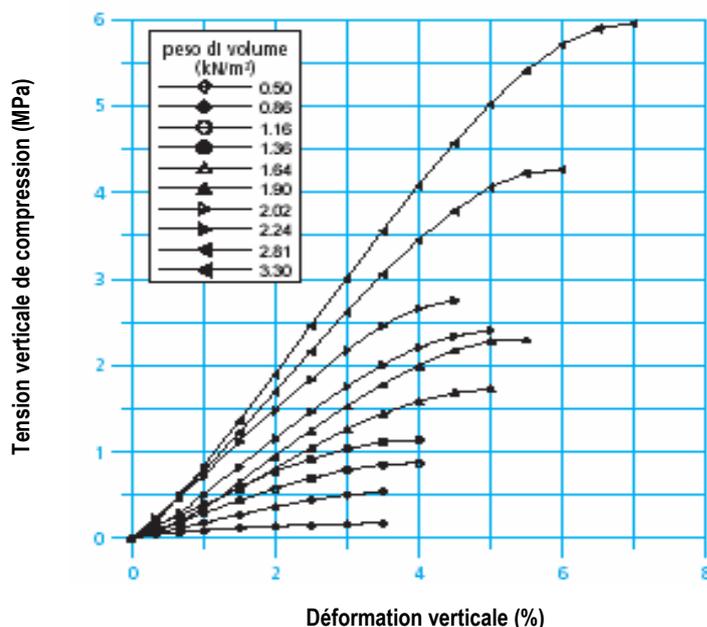


Figure 1, résultats des épreuves de résistance à la compression uniaxiale

Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale déterminées sur des éprouvettes avec un poids de volume important sont bien supérieures à ceux des terrains naturels.

Sur les courbes de déformation pour compression, on a calculé les coefficients d'élasticité qui correspondent à trois déformations (0,33; 0,67 et 1%). Les résultats, compris entre 15 et 85 MPa, sont nettement supérieurs aux valeurs de terrains meubles non-cohésifs ou cohésifs de moux à compacts.

- **Résistance à la traction uniaxiale**

Pour les applications actuelles du produit la résistance à traction a une importance relative : en ce qui concerne les terrains naturels, la résine polymérisée possède une résistance à la traction assimilable à la résistance à la compression. L'épreuve de traction a été conduite sur des éprouvettes de section transversale réduite (25mm). Les valeurs de résistance à la traction déterminées pour des poids de volume de 0,7 à 5,0 kN/m³ étaient comprises dans l'intervalle de valeur 0,5 – 8,0 MPa.

- **Comportement de déformation**

Chez l'Institut de test IFB Gauer, on a étudié la courbe force-déformation d'éprouvettes de résine Uretek Geoplus® expansée et durcie, caractérisées par des poids et des volumes différents.

Dans les épreuves de compression édométrique a été déterminé le comportement d'éprouvettes avec des poids et des volumes compris entre 1 et 3 kN/m³. Au cours des tests on a eu la possibilité de délimiter nettement le champ de déformation élastico-linéaire de celui plastique et de déterminer celles qu'on appelle tensions maximales soutenables, sous l'action desquelles ne se vérifient pas encore de déformations plastiques. En plus on a pu calculer les coefficients d'élasticité valables pour le champ élastique. Dans le tableau 1 sont rapportés les résultats correspondants aux trois poids de volume.

Tableau 1, récapitulation des résultats des tests

Densité	kg/m ³	100	200	300
Tension maximale soutenable	N/mm ²	0.77	2.20	5.30
Déformation	‰	50	40	90
Coefficient d'élasticité	N/mm ²	15.4	55.0	58.9

- **Caractéristiques de déformation sous charge dynamique**

Toujours chez l'Institut de test IFB Gauer, des tests de compression triaxiale ont déterminé les caractéristique de déformation des éprouvettes avec des poids de volume différents sous charge dynamique. La charge dynamique simule le passage de véhicules lourds à plusieurs axes. Les éprouvettes ont été soumises à 20.000 cycles de charge avec différentes amplitudes de pression (0,5; 0,7 et 0,9 N/mm²), pour ensuite en mesurer la déformation.

Comme prévisible, les éprouvettes avec un poids de volume réduit égal à 100 kg/m³ font enregistrer des valeurs de déformation les plus hauts (0,7 mm) à l'amplitude maximale de pression. À la même amplitude, mais avec un poids de volume de 200 kg/m³, la déformation se réduit déjà à 0,2 mm. La plupart des déformations peuvent être reconduits à une consolidation initiale de l'éprouvette : les valeurs de déformation visqueuse apparaissent donc négligeables.

Propriétés chimiques – Toxicité

- **Analyse des éluats**

Pour les recherches sur les caractéristiques d'érosion, on a conduit des recherches des éluats sur des carottages et des échantillons de résine Uretek Geoplus® expansée et polymérisée dans le terrain. En même temps on a étudié l'éluée du terrain naturel.

Les résultats des épreuves d'éluion mettent en évidence des différences minimales entre l'éprouvette de référence (terrain naturel) et les éprouvettes de résine. En ce qui concerne l'emploi du produit Uretek Geoplus® on ne remarque aucun motif de préoccupation important.

- **Détermination de l'écotoxicité**

La détermination de l'écotoxicité de Uretek Geoplus® a été conduite sur des échantillons de résine expansée et durcie dans le terrain. Dans les limites des recherches ont été évaluées l'inhibition de la croissance des plantes, la toxicité sur les lombrics et la détermination de l'inhibition de l'émission lumineuse des bactéries (test sur des bactéries luminescentes).

Sur la base des résultats, le produit ne peut pas être classé comme toxique ou nuisible et par conséquent il n'est pas soumis à l'identification R 54 (toxique pour la flore).

TEST D'APTITUDE

L'aptitude du matériel d'injection à l'amélioration de la capacité portante du hourdis doit être prouvée à travers les épreuves de compression à grande échelle. Voir partie 2.

PARTIE 2 : ESSAIS D'INJECTION À GRANDE ÉCHELLE

Notes générales – Structuration des épreuves

En automne 2009 on a conduit des épreuves d'injection à grande échelle avec le produit Uretek Geoplus® dans le terrain de l'AIT.

Le but des études était de démontrer l'effet positif du mélange pour injection Uretek Geoplus® sur la capacité portante de terrains naturels de différente nature en utilisant des méthodes de recherche géotechnique. Les recherches conduites ont prévu la réalisation d'essais pénétrométriques dynamiques avec un instrument DPL : le mesurage du contenu d'eau avec une sonde isotopyque ; la détermination du coefficient de déformation dynamique avec une plaque de charge dynamique ; ainsi que des essais de charge avec une plaque circulaire (DN 600mm).

Les épreuves ont été conduites dans trois types différents de terrain naturels, sans injection (terrain de référence) et avec injection. De la comparaison des résultats obtenus avec et sans injection on a pu définir l'efficacité ou l'action améliorante dans le terrain du mélange pour injection.

Tous les essais ont été effectués en présence de conditions aux contours parfaitement définis et reproductibles (densité à sec, contenu d'eau, degré de compactage) pour garantir la comparaison des résultats.

Comme substrats naturels ont été utilisés un terrain de nature non-cohésif (du calcaire de Leitha) et deux terrains cohésifs (Tegel et Löss).

Les épreuves ont été conduites dans trois récipients cylindriques remplis avec les trois terrains naturels. Dans chaque récipient on a inséré un volume d'environ 2,4 m³ ; chaque terrain ont été insérés dans le récipients pour l'épreuve de référence (terrain non injecté) et l'épreuve d'injection en conditions presque égales (densité et contenu d'eau).

Dans le cadre des épreuves de charge, sur les récipients on a appliqué – d'une façon alternante – un élément portant constitué par deux supports d'acier en forme de « I » et reliés l'un à l'autre grâce à des barres d'acier. Le matériel dans les récipients a été soumis à une charge obtenue avec une plaque de charge d'un diamètre de 60 cm et complète d'un cylindre hydraulique et d'une presse. Le tassement de la plaque a été enregistré avec l'aide de quatre dispositifs à comparateur. Dans la figure 2 le mécanisme d'épreuve est illustré, les figures 3 et 4 montrent ultérieurs détails.

Avantage de ce mécanisme d'épreuve

- Conditions aux contours définis avec clarté.
- Terrain homogène avec des paramètres clairement définissables (densité à sec, contenu d'eau).
- Possibilité d'évaluer la totalité du volume améliorée.
- Recherche parallèle de différents types de terrain dans un endroit unique (trois récipients l'un à côté de l'autre avec de différents types de terrain).

But des épreuves

- Détermination des paramètres géotechniques de base des terrain injectés avec l'aide des méthodes de recherche conventionnelles (des sondages, détermination de la densité).
- Détermination des courbes d'affaissement/temps pour de différentes charges appliquées.
- Comparaison du comportement de déformation des terrains injectés et non injectés en présence de conditions aux contours définis et avec le même procédé de charge.
- Détermination et comparaison du coefficient de déformation (E_v) des terrains injectés et non injectés.

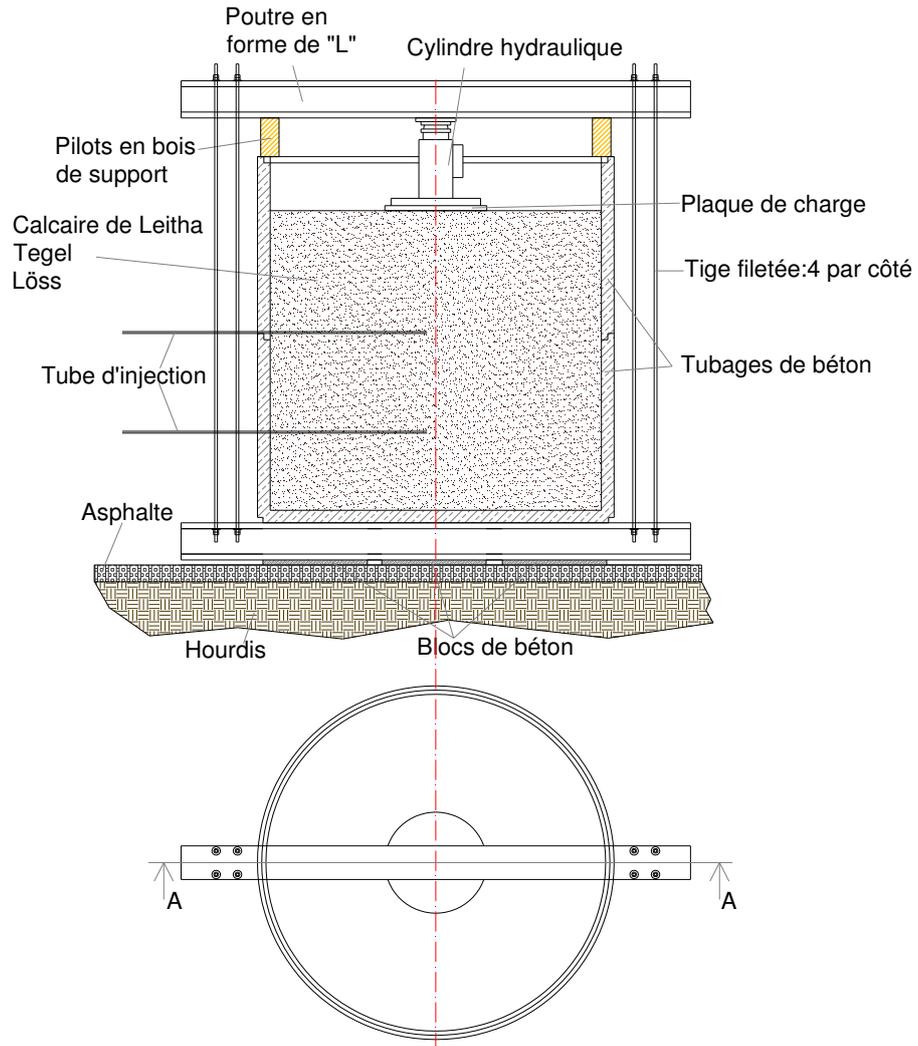


Figure 2 Schéma du dispositif d'essai



Figure 3 Plaque de charge avec des éléments portants



Figure 4 Plaque de charge et plaque de charge avec des dispositifs à comparateur

Résultats et conclusions des recherches géotechniques

Ci-dessous les résultats des essais géotechniques conduites et les conclusions qu'on peut déduire pour les trois types de terrain analysés.

Terrain de nature non-cohésif – calcaire de Leitha

- Tests de charge

Le calcaire de Leitha injecté, appelé Geoplus® dans les schémas suivants, s'est démontré résistant à la charge maximale du projet égal à 500 kN/m². Dans le cas de terrain non injecté (terrain de référence) on a dû terminer le test à 400 kN/m² pour les forts tassements. Le graphique charge-déformation représenté dans la figure 5 indique de façon très claire les tassements essentiellement inférieurs auxquels est sujet le terrain injecté par rapport au terrain de référence. En particulier les augmentations de charge jusqu'à 200 kN/m² produisent des tassements réduits, car le terrain de référence dans ce cas-ci présente des valeurs 10 fois plus élevées.

Le cycle de charge à 300 kN/m² met en évidence dans les deux cas un cours très plat, ou bien il s'agit de déformations plastiques de la structure granulaire entière. Il ne semble pas qu'il y ait aucune indication d'une compression et décompression élastique de la résine expansée.

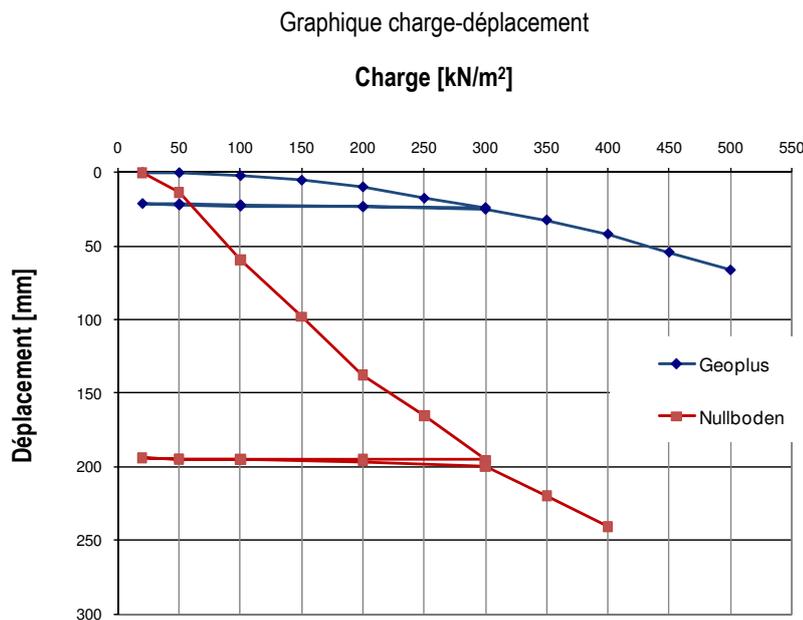


Figure 5, schéma charge-déplacement du calcaire de Leitha injecté et non injecté

- Test pénétrométrique

Après les test de charge, on a conduit des sondages avec un pénétromètre léger directement au-dessous de la plaque de charge. Les résultats des tests sur le terrain injecté (Geoplus®) et sur le terrain de référence sont illustrés dans la figure 6. Pour les 30 premiers centimètres on ne met en évidence aucune différence substantielle, car les deux terrains résultent également compactés par effet de la charge. Seulement au-dessous, le sondage dans le terrain injecté fait enregistrer une nette augmentation de la fréquence de coups tous les 10 cm de pénétration. À une profondeur de 0,9 m,

le test pénétrométrique dans le terrain injecté a été arrêté par refus instrumental, à cause de la présence d'une pierre.

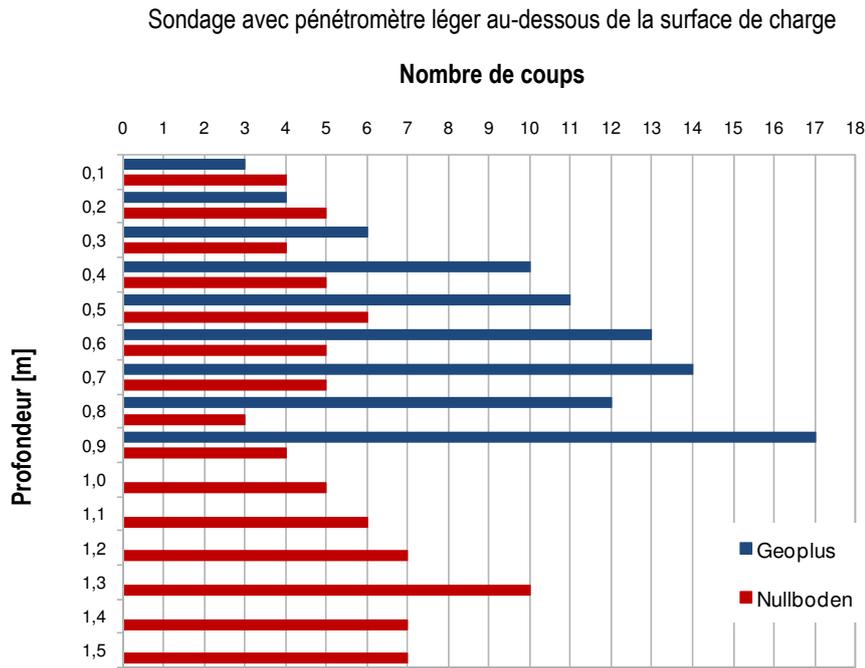


Figure 6, valuation du sondage avec pénétromètre léger dans le calcaire de Leitha

- Test de charge dynamique sur plaque

Après le test de charge, avec la plaque dynamique on a conduit aussi des mesurages du coefficient de déformation dynamique dans l'aire au-dessous de la plaque de charge et en trois points dans un rayon d'environ 1 m. Les résultats des mesurages sont récapitulés dans le tableau 2. Le point de mesurage 1 se trouve dans l'aire du terrain compacté par effet des épreuves de charge, les trois autres points de mesurage sont distribués dans ses environs. Le paramètre Evd du terrain injecté est de peu supérieur à celui du terrain de référence.

Tableau 2, résultats des épreuves de charge sur plaque

Point de mesurage	Geoplus®	Terrain de référence
	Evd	Evd
1	17,36	15,62
2	12,59	8,67
3	14,97	12,80
4	10,94	11,58

- Valutation visuelle de l'aire d'injection

Pour comprendre au mieux l'expansion et le comportement du mélange injecté dans le terrain, à la fin des épreuves l'aire d'injection a été creusée. Les anneaux de béton ayant un diamètre de deux mètres, les excavations effectuées avec l'aide d'un excavateur ont été très difficiles. Même en utilisant la pelle la plus petite, les possibilités d'excavation étaient très limitées. Dans une large mesure - on a donc dû recourir à l'excavation manuelle.

Dans le cas du calcaire de Leitha de nature granulaire, le mélange a pénétré les espaces vides avec la conséquente formation d'un conglomérat monolithique qui possède de considérables propriétés mécaniques, voir figure 7. L'expansion de la résine a eu lieu sur une large superficie de façon uniforme, figure 9. Il en résulte une bonne

agrégation avec l'amas traité. Directement en correspondance du point d'injection, au centre du tube, s'est formé un amas de résine caractérisé par une excellente résistance, figure 8. À la surface on n'a remarqué aucun écoulement.



Figure 7, mélange de gravier et résine Uretek Geoplus®



Figure 8, zone environnant le point d'injection



Figure 9, expansion de la résine dans le gravier

Terrain cohésif – Tegel

- Test de charge

Le tegel injecté, appelé Geoplus® dans les schémas suivants, s'est démontré résistant à la charge maximale de projet égal à 400 kN/m², voir figure 10. Dans le cas du terrain non injecté (terrain de référence), on a dû terminer l'épreuve à 200 kN/m² à cause de forts tassements, figure 10. Le graphique charge-déplacement représenté pour le terrain de référence doit s'entendre comme état de rupture. L'effet de l'injection sur le comportement de tassement sous charge peut être défini excellent. Pour des augmentations de charge jusqu'à 200 kN/m², les tassements résultent réduits d'environ 10 fois. Les augmentations de charge suivantes mettent en évidence une augmentation des tassements légèrement supérieure, mais sans déterminer de conditions propices à la rupture du terrain.

Le cycle de déchargement à 300 kN/m² met en évidence pour le terrain injecté un cours extrêmement plat, ou bien il s'agit de déformations plastiques de la structure granulaire entière. Il ne semble pas qu'il y ait aucune indication d'une compression et décompression élastique de la résine expansée.

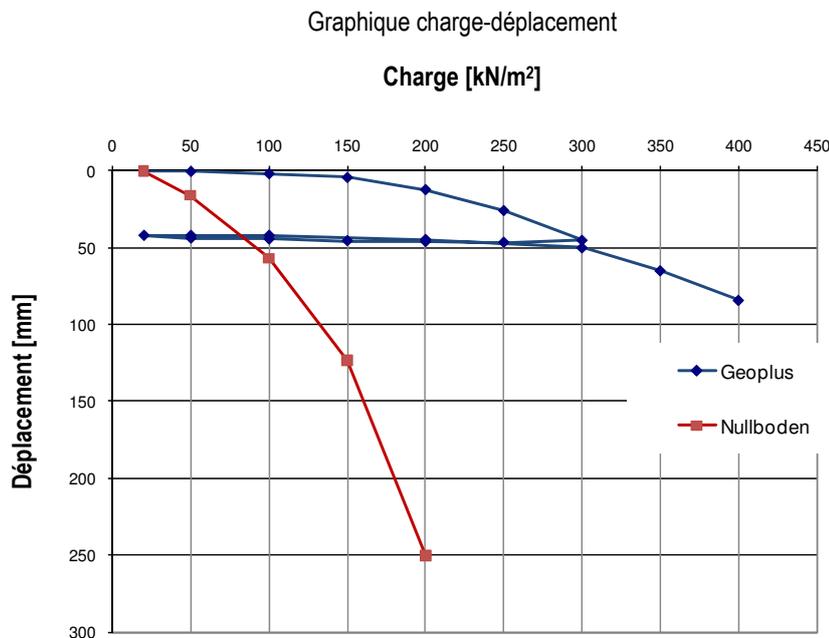


Figure 10, schéma de charge- déplacement tegel

- Test pénétrométrique

Après les tests de charge, on a conduit des sondages avec un pénétromètre léger directement au-dessous de la plaque de charge. Les résultats des tests sur le terrain injecté (Geoplus®) et sur le terrain de référence sont illustrés dans la figure 11. On peut ici relever clairement une augmentation du nombre des coups dans le terrain injecté. En particulier dans l'aire comprise entre 0 et 0,9 m, le terrain injecté montre environ une augmentation de 100% du nombre de coups pour un avancement de 10 cm de pénétration.

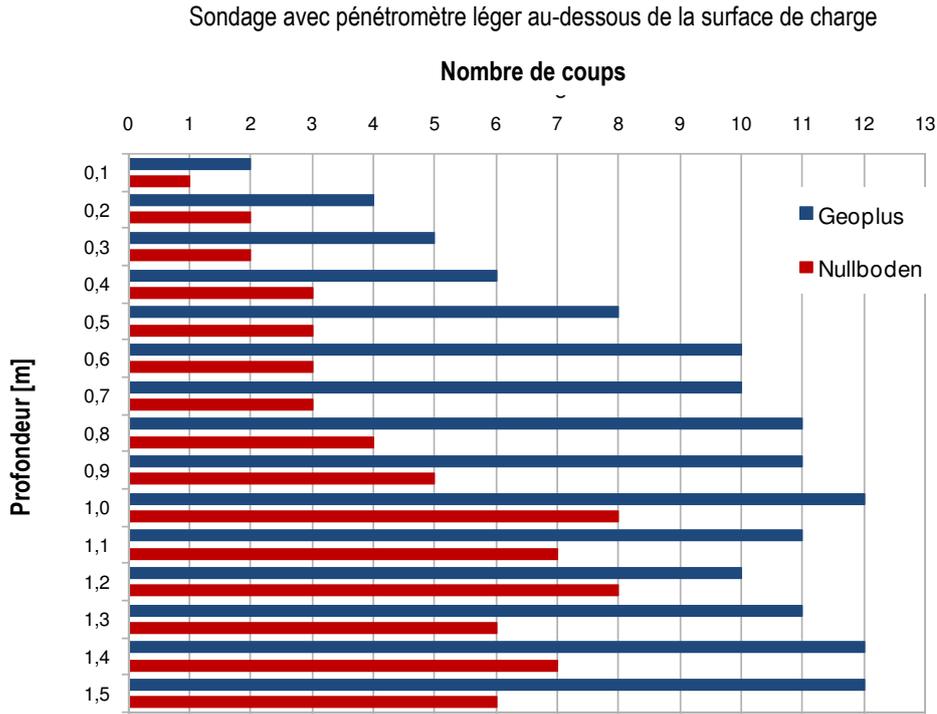


Figure 11, valuation des sondages avec pénétromètre léger dans le tegel

- Test dynamique sur plaque

Après le test de charge, avec la plaque dynamique on a conduit également des mesurages du coefficient de déformation dynamique dans l'aire au-dessous de la plaque de charge et en trois points dans un rayon d'environ 1 m. Les résultats des mesurages sont récapitulés dans le tableau 3. Le point de mesurage 1 se trouve dans l'aire du terrain compacté par effet des épreuves de charge, les trois autres points de mesurage sont distribués dans ses environs. Le paramètre Evd du terrain injecté est nettement supérieur à celui du terrain de référence. Comme prévu, le point de mesurage directement au-dessous de la charge met en évidence dans les deux terrains la valeur de Evd la plus haute; cependant, dans le terrain injecté, cette valeur est 3 fois plus grande. Cet élément, avec les résultats du sondage pénétrométrique, montre l'effet d'amélioration sur le terrain également dans la bande la plus haute, jusqu'à 1 m environ au-dessous de la surface.

Tableau 3, résultats des tests de charge dynamique sur une plaque dans le tegel

Point de mesurage	Geoplus®	Terrain de référence
	Evd	Evd
1	14,67	4,75
2	11,13	3,60
3	9,98	3,70
4	11,50	3,50

- Valuation visuelle de l'aire d'injection

Dans le Tegel, le matériel d'injection a constitué dans le terrain un épais réseau de lames. Grâce à cette structure lamellaire se vérifie d'un côté une compactation localisée dans le terrain près des lames et de l'autre côté sa fortification par effet du réseau. Les figures 12 et 14 montrent la structure lamellaire. À la surface on n'a remarqué aucun écoulement.



Figure 12, expansion du matériel d'injection dans le Tegel



Figure 13, expansion du matériel d'injection dan le Tegel



Figure 14, expansion du matériel d'injection dans le Tegel

Terrain cohésif – Löss

- Tests de charge

Le Löss, appelé Geoplus® dans les schémas suivants, n'a pas soutenu la charge maximale du projet égal à 400 kN/m². À 200 kN/m² on a dû interrompre le test de charge à raison de forts tassements, figure 15. Dans le terrain non injecté (terrain de référence), de forts tassements se sont produits déjà à la première augmentation de la charge. Le terrain de référence peut donc être classé comme non résistant. L'effet de l'injection sur le comportement du tassement sous charge peut être défini très bon. Pour les augmentations de charge jusqu'à 100 kN/m², les tassements résultent réduits de 10 fois environ. Les augmentations de charge suivantes mettent en évidence une forte augmentation des tassements. En tous les cas l'augmentation de la capacité portante par effet de l'injection est clairement mise en évidence.

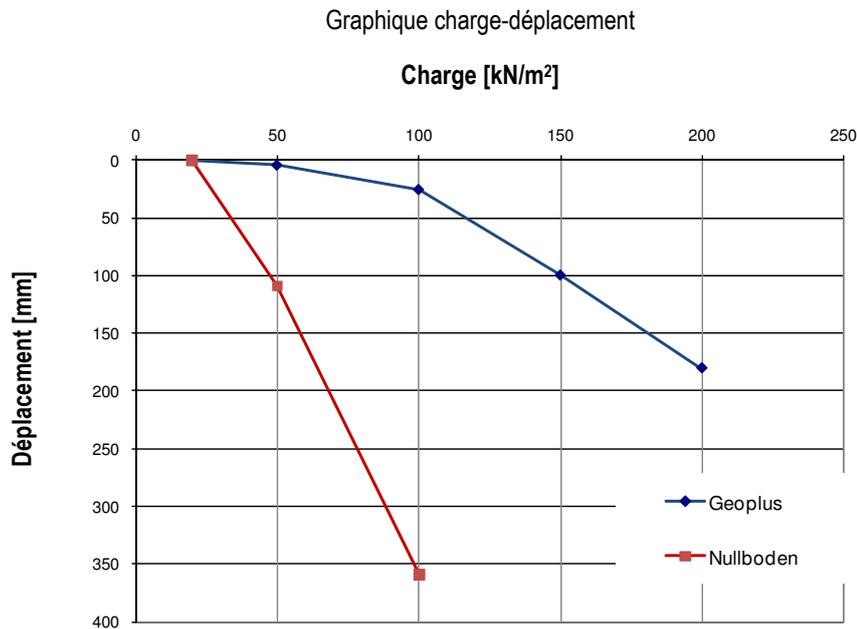


Figure 15, schéma charge-déplacement - löss

- Test pénétrométrique

Après les tests de charge, on a conduit des sondages avec un pénétromètre léger directement au-dessous de la plaque de charge. Les résultats des tests sur le terrain injecté (Geoplus®) et sur le terrain de référence sont illustrés dans la figure 16. Dans ce cas, on peut relever clairement une augmentation du nombre des coups dans le terrain injecté.

Jusqu'à une profondeur de 0,5 m, le compactage qui résulte des tests de charge est reconnaissable dans les deux terrains. Au-dessous, le terrain de référence se présente beaucoup moins compact, par contre le terrain injecté met en évidence une augmentation du nombre des coups N_{10} égal à trois/quatre fois les valeurs initiales.

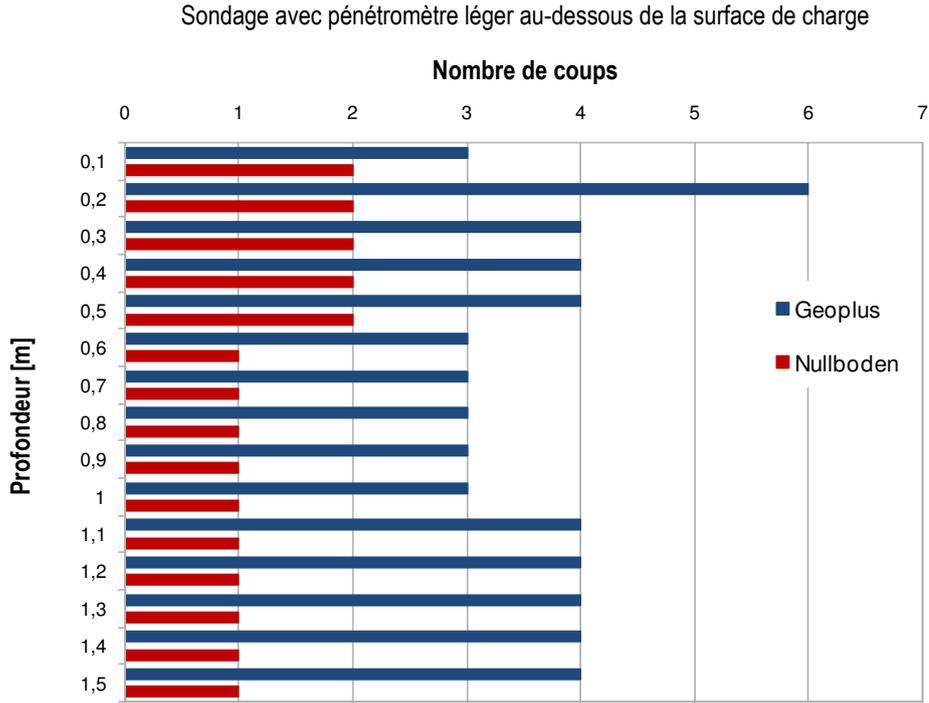


Figure 16, valuation du sondage avec pénétromètre léger dans le Löss

- Test de charge dynamique sur plaque

Après le test de charge, avec la plaque dynamique ont été également effectués des mesurages du coefficient de déformation dynamique dans l'aire au-dessous de la plaque de charge et en trois points dans un rayon d'environ 1 m. Les résultats des mesurages sont récapitulés dans le tableau 4. Le point de mesurage 1 se trouve dans l'aire du terrain compacté par effet des épreuves de charge, les trois autres points de mesurage sont distribués dans ses environs. Le paramètre Evd du terrain injecté est légèrement supérieur à celui du terrain de référence.

Tableau 4, résultats des tests de charge dynamique sur plaque dans le Löss

Point de mesurage	Geoplus®	Terrain de référence
	Evd	Evd
1	13,35	13,31
2	6,45	4,52
3	5,77	5,04
4	6,10	5,08

- Valuation visuelle de l'aire d'injection

En raison de la compacité très réduite du Löss, la résine en sortant du tube d'injection a occupée au début un volume presque sphérique, voir figure 17. Pendant l'expansion suivante de la résine se sont formées d'épaisses lames orientées vers la surface. Le matériel d'injection est ensuite sorti vers la surface. En considération de la force d'expansion très élevée, la résine a pu comprimer le terrain meuble et elle est remontée à la surface à cause de la basse densité. Le phénomène est clairement mis en évidence dans la figure 18 et 19.



Figure 17, expansion du produit dans l'aire environnant le point d'injection



Figure 18, expansion du produit dans l'aire environnant le point d'injection



Figure 19, expansion du produit dans l'aire environnant le point d'injection

Récapitulation et interprétation des tests d'injection à grande échelle

Le but des recherches était de démontrer l'effet positif des injections de résine Uretek Geoplus® sur la capacité portante des terrains naturels de différentes natures en utilisant des méthodes conventionnelles d'étude géotechnique.

Le domaine d'étude établi comprenait des sondages avec le pénétromètre léger DPL, des mesurages de la densité et du contenu d'eau avec une sonde isotopique, la détermination du coefficient de déformation dynamique avec une plaque de charge dynamique, ainsi que la conduction de tests de charge avec une plaque circulaire (DN 600 mm).

Comme substrats naturels ont été utilisés un terrain de nature non-cohésive (Calcaire de Leitha) et deux terrains cohésifs (Tegel et Löss). Ces terrains meubles sont très répandus en Autriche et peuvent donc être considérés représentatifs.

Tous les tests ont été conduits en présence de conditions très bien définies et reproductibles (densité en sec, contenu d'eau, degré de compactation), afin de garantir la fiabilité de la comparaison des résultats.

Les résultats obtenus des études peuvent être résumés comme suit :

- les résultats des tests de charge mettent clairement en évidence l'effet positif du matériel d'injection Uretek Geoplus® expansé et polymérisé sur le comportement de déformation ainsi que sur la capacité portante des types de terrains qui ont fait l'objet des études.
- Dans le cas de terrains non-cohésifs (Calcaire de Leitha), l'injection a permis d'obtenir une nette réduction des tassements induits par la charge simulée sur les fondations. La courbe de tassement sous charge résulte nettement aplatie. Le cycle de charge montre d'une manière analogue un cours horizontal: il s'agit donc de déformations plastiques. On ne relève aucune indication de compression et décompression élastique de la résine expansée. L'observation de l'aire d'injection révèle que le matériel a complètement rempli les vides et a donné origine à une structure du terrain qui présente les caractéristiques d'un conglomérat. L'expansion de la résine a eu lieu uniformément sur une large superficie.
- Dans des cas de terrains de nature cohésive (Tegel et Löss), l'injection a également déterminé une nette réduction des tassements induits par le test de charge. De plus, la capacité portante résulte décidément meilleure. Ceci est évident si l'on observe les courbes de tassement sous charge du Tegel. Le tegel non injecté rejoint sa capacité portante limite à environ 200 kN/m², tandis que le terrain injecté avec de la résine Uretek Geoplus® est capable de soutenir la charge maximale de 400 kN/m². La résine a formé dans le tegel un épais réseau de lames: c'est grâce à cette structure lamellaire qu'ont lieu – d'un côté – un compactage localisé du terrain près des lames et de l'autre côté sa fortification par effet de réticule.
- À cause de sa compacité extrêmement réduite, le terrain de Löss analysé représente un cas à part. Dans le terrain non injecté, la capacité portante limite est atteinte déjà aux premiers cycles de charge. Après l'injection il résulte – au contraire – que l'on peut appliquer une charge jusqu'à 100 kN/m² avec des tassements encore acceptables: ceci signifie une nette augmentation de la capacité portante et en même temps la réduction des tassements résultants.