

## Technicité

# Guide pour l'amélioration des sols de construction par injections de résine URETEK



à commander par courriel chez [uretek@uretek.ch](mailto:uretek@uretek.ch)

Le guide de conception pour l'amélioration des sols par l'injection de résine polyuréthane (PUR) expansive a été traduit de l'italien en allemand (existe aussi en français). L'objectif principal du livre est de mettre à disposition des concepteurs de mesures d'amélioration des sols, grâce à la méthode URETEK, une base de travail ainsi que des instructions pour leur permettre de prédimensionner individuellement de telles mesures.

### Déroulement du travail

Les propriétés physiques et mécaniques du PUR ainsi que ses domaines d'application généraux sont décrits en introduction dans le guide. Les domaines et possibilités d'application géotechniques de la méthode URETEK sont multiples. Pour exécuter les injections à

une profondeur donnée, la résine PUR est injectée à l'état liquide dans le sol à consolider par des tubes d'injection introduits dans des petits forages d'un diamètre maximal de 30 mm, préalablement forés. La résine PUR injectée gonfle alors fortement et agit de manière à compacter le sol environnant, ce qui permet une augmentation de la portance du sol. Dans les sols à grains grossiers (sables et graviers), l'injection PUR

traverse les volumes des vides et il se crée un conglomérat monolithique avec des propriétés mécaniques plus importantes (figure 1), par contre les pores des sols cohérents à grains fins (argiles et limons) ne sont pas traversés mais il se forme un réseau à mailles serrées et lamellaire semblable aux racines d'une plante (figure 2).

Figure 1



Figure 2



## Possibilités d'application

L'augmentation de la portance ou l'amélioration du sol d'infrastructures existantes destinées à être surélevées, pour permettre une densité d'utilisation plus importante ou un changement d'affectation, sont des exemples de possibilités de mise en oeuvre pour des injections plus profondes dans le sol. Une autre application est la sauvegarde d'immeubles présentant des dégâts dus à des tassements. L'injection de résine PUR à certaines profondeurs peut permettre une stabilisation du sol ou de compenser des tassements différentiels par le relevage des fondations (figure 3). La stabilisation ou le relevage de bâtiments au moyen d'injection de résine PUR peut présenter une alternative moins onéreuse que la reprise en sous-oeuvre conventionnelle.

La procédure et les effets sont semblables pour les injections proches de la surface du sol. Les possibilités de mise en oeuvre peuvent pourtant être considérablement élargies. Il est possible, par exemple, d'améliorer des routes par une stabilisation ou de relever des couches de fondation de routes (coffrages), couche de couverture comprise. La stabilisation de culées de ponts et de murs de soutènement est également possible par des injections de résine PUR dans le sol. En outre, l'injection de résine PUR dans des sols se contractant ou gonflant (argiles) permet de réduire la perméabilité hydraulique. Il en résulte des déformations différentielles plus faibles et donc moins de dégâts (fissures) aux infrastructures ou bâtiments existant.

## Avantages

Les avantages principaux de la méthode URETEK par rapport aux mesures conventionnelles d'amélioration des sols ou de reprise en sous-oeuvre de bâtiments sont une courte période de travaux et une intervention constructive minimale. Pour introduire les tubes d'injection, des trous d'un diamètre maximal de 30 mm sont forés par la fondation. Ceux-ci peuvent également être exécutés à l'intérieur de bâtiments et provoquent peu de dérangements. Dans la plupart des cas, seuls des travaux d'excavation peu importants sont nécessaires, par exemple lorsque il faut ajuster des conduites de services



Figure 3

dans une cave à la suite du relevage d'un immeuble ou placer les presses plates d'assistance (figure 4). L'élimination simple de tassements différentiels qui peut être réalisée également sous les murs intérieurs d'une cave ou au milieu de la dalle de fondation présente bien des avantages. L'élimination des mêmes dégâts est beaucoup plus compliquée et onéreuse par une méthode classique de reprise en sous-oeuvre par micro-pieux. Les injections de résine PUR expansive permettent, outre d'augmenter la portance du sol, de diminuer la perméabilité de celui-ci. A cause de tous ces nombreux avantages la méthode URETEK est une alternative attractive pour l'amélioration de sols de construction ou pour des relevages de bâtiments.

## Théorie de la fissuration

Dans le guide, plusieurs des multiples domaines d'application cités ci-dessus sont étayés dans les chapitres suivants par des modèles théoriques et numériques (figure 5). En particulier, les conditions aux limites de la théorie de la fissuration, appliquée pour les relevages d'immeubles, sont décrites en détail. Dans la plupart des cas, les bâtiments à relever sont fondés dans des conditions de consolidation normales du sol de construction avec un

Figure 5

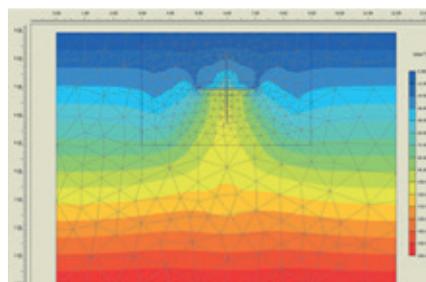


Figure 4

coefficient de poussée des terres au repos de  $K_0 < 1.0$  ( $K_0 = \text{contrainte horizontale} / \text{contrainte verticale}$ ). Dans ces conditions, une première série d'injections de résine induit, à une profondeur déterminée, la création de fissures en direction verticale. L'expansion de la résine conduit à une augmentation des contraintes horizontales à l'endroit du sol injecté et une deuxième série d'injections permet alors la formation de fissures dans le plan horizontal. La formation de ces fissures provoque ainsi le relevage des fondations du bâtiment.

Des exemples numériques d'injections de résine PUR expansive dans des sols à grains grossiers et dans des sols à grains fins sont présentés à la fin du guide.

## Assurance qualité du guide

Le «Kompetenzzentrum für Kunststoffe im Bauwesen (KIB)» (centre de compétence pour matières synthétiques dans la construction) de la HSR Hochschule für Technik de Rapperswil a été mandaté par URETEK Schweiz AG pour procéder à l'assurance qualité de la traduction de l'italien en allemand du guide. Parallèlement, une collaboration active existe depuis un certain temps dans Ra&D, Recherche appliquée et Développement. D'autres informations relatives au centre de compétence se trouvent sous [www.kib.hsr.ch](http://www.kib.hsr.ch).

**Christian Bommer, MSc ingénieur civil, directeur KIB**



## Exemple de calcul:

### Situation initiale

A Grindelwald, un chalet d'une quarantaine d'années ayant subi des tassements différentiels a été relevé au moyen d'injections de résine expansive. Des mouvements plus importants sont apparus avant l'intervention. L'étude de la stabilité du talus a montré que le bâtiment se trouve dans un glissement. La masse en mouvement se déplace d'env. 50 à 100 mm par an. Les tassements différentiels sont dus à des mouvements de terrain irréguliers. Outre le relevage du bâtiment, les injections ont également amélioré les propriétés du sol. La portance du sol de construction a été améliorée et sa sensibilité aux tassements diminuée. Le contrôle de ses améliorations s'est fait à l'aide de sondages au pénétromètre. La preuve par le calcul selon Swisscode n'a pas été faite. C'est pourquoi, une proposition a été élaborée pour montrer la manière dont la preuve de l'amélioration du sol de construction peut être apportée.

### Bases relatives aux injections de résine expansive

La résine utilisée pour les injections possède la propriété de pouvoir subir un gonflement multiple. Le sol est compacté par ce gonflement à

l'endroit des injections. Le rapport de gonflement (volume final de la résine expansée  $V_{re}$  par rapport au volume initial de la résine à l'état liquide  $V_{ra}$ ) décrit l'expansion de la résine. Il est fonction de la pression de gonflement  $P$  de la résine. La pression de gonflement diminue lorsque le rapport de gonflement augmente. La relation peut être décrite par un rapport empirique et représentée graphiquement en tant que courbe rhéologique.

L'importance de la pression de gonflement de l'injection induite dépend des propriétés du sol et des contraintes dans celui-ci. Pour la calculer, la courbe de réaction du sol doit être établie. Celle-ci représente la tension de confinement moyenne (pression à la surface limite entre injection et matériel de sol) en fonction du rapport de gonflement de l'injection. La pression de gonflement augmente avec l'augmentation du gonflement. Si la courbe de réaction est représentée dans le même diagramme que la courbe rhéologique, les deux courbes se recoupent. Un équilibre des forces entre la tension de confinement moyenne et la pression de gonflement règne au point d'intersection. La résine gonfle jusqu'à ce que cet équilibre

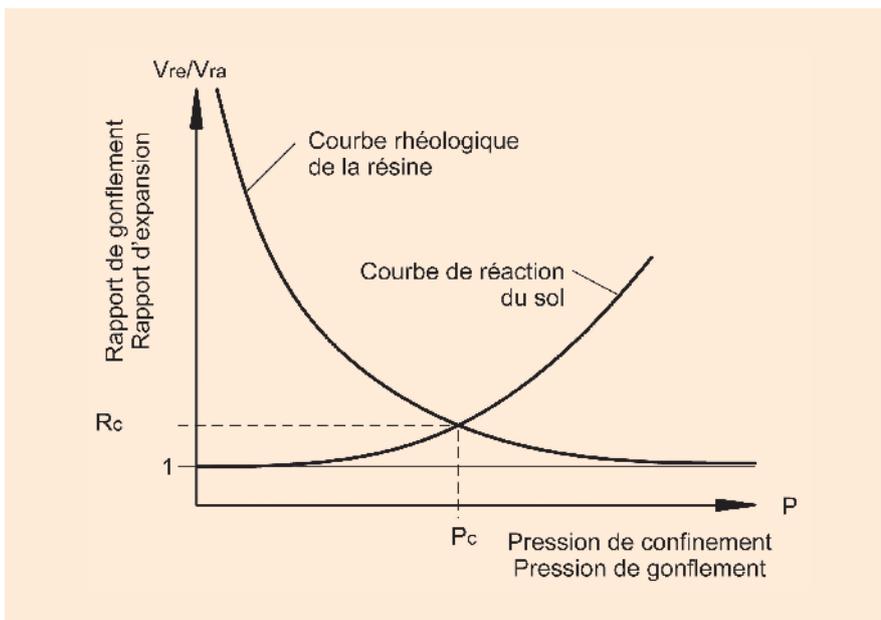
soit atteint. L'expansion effective  $R_c$  et la pression de gonflement  $P_c$  d'une injection sont ainsi déterminées.

### Modélisation du projet considéré

L'amélioration du sol de construction du projet considéré a été analysée au moyen d'un modèle numérique simple. Le modèle bidimensionnel a été réalisé avec le logiciel Plaxis 2D. Il représente une coupe longitudinale à travers la fondation longue de 12 m. Le sous-sol est composé d'une couche de sol homogène d'une puissance de 10 m. Des injections de forme sphérique ont été réalisées à trois niveaux sous la fondation (-0.50, -1.50 et -2.50 m sous la surface du terrain). Les injections sont disposées dans un réseau régulier à une distance de 1 m les unes des autres. Pour simplifier, on a modélisé une surface du terrain plane. Le glissement actif dans la région n'a pas été pris en compte.

Une courbe de réaction a été établie pour chaque point d'injection. Ce qui a permis de déterminer le rapport de gonflement effectif et la pression de gonflement à l'aide de la courbe rhéologique.

Diagramme qualitatif avec courbe rhéologique de la résine et courbe de réaction du sol



## Variations de l'état des contraintes dans le sol

Avant l'injection, les contraintes dans le sol étaient dues au poids du terrain et au poids du bâtiment. Les injections ont provoqué une augmentation des contraintes verticales et des contraintes horizontales (siehe Abbildungen rechts).

## Quantification de l'amélioration du sol

Le sol est surconsolidé à la suite des injections. Pour les sols surconsolidés, le coefficient de pression des terres au repos  $k_0$  et le rapport entre la contrainte horizontale  $\sigma'_h$  et la contrainte verticale  $\sigma'_v$  sont plus importants que pour les sols normalement consolidés. Si le coefficient de pression au repos augmente, le degré de surconsolidation OCR est le seul paramètre pouvant s'adapter. Avec les contraintes connues après les injections et l'angle de frottement interne du sol  $\phi'$ , il est possible de saisir le degré de surconsolidation.

$$k_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = [1 - \sin(\phi')] \cdot OCR^{\sin(\phi')}$$

### Formule 1: coefficient de tension au repos $k_0$

$$OCR = \frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_v} = \left[ \frac{-k_0}{\sin(\phi') - 1} \right]^{\frac{1}{\sin(\phi')}} = \left[ \frac{-\sigma'_h}{(\sin(\phi') - 1) \cdot \sigma'_v} \right]^{\frac{1}{\sin(\phi')}}$$

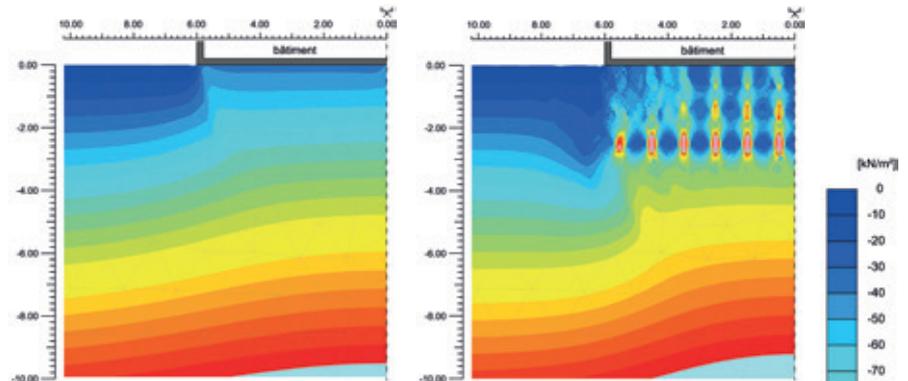
### Formule 2: degré de surconsolidation OCR

Les sols à grains fins surconsolidés présentent typiquement une cohésion dans laquelle la surconsolidation est « stockée ». L'amélioration du sol par des injections de résine expansive provoque une augmentation de la résistance au cisaillement et de cette cohésion. Une formule a été dérivée pour la relation entre la surconsolidation et la cohésion.

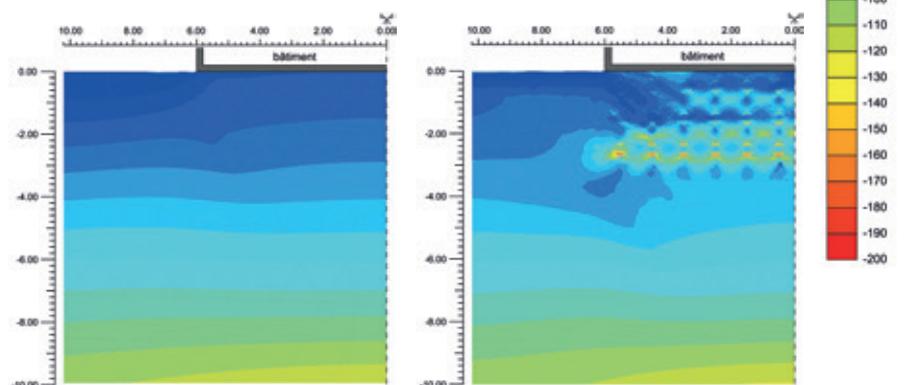
$$c' = \tan(\phi') \cdot (OCR - 1) \cdot \sigma'_v$$

### Formule 3: cohésion $c'$ pour cause de surconsolidation

Les sols non cohérents, à grains grossiers ne présentent généralement pas de cohésion. Pourtant, la résistance au cisaillement augmente à cause des angles de frottement  $\phi'_{max}$  plus élevés.



Contrainte verticale effective  $\sigma'_v$  avant (à gauche) et après (à droite) l'injection



Contrainte horizontale effective  $\sigma'_h$  avant (à gauche) et après (à droite) l'injection

Les dépôts compacts de matériel de sol provoquent un « emboîtement » des grains. Ce comportement est quantifié par l'angle de dilatance  $\psi$ .

$$\tan(\phi'_{max}) = \tan(\phi') + \tan(\psi)$$

### Formule 4: angle de frottement interne maximal

Outre la résistance au cisaillement, le module d'élasticité ME augmente également. A la suite de la surconsolidation et du compactage, le sol se comporte comme dans le cas d'une remise en charge. Si les pentes des droites de la charge initiale et de la seconde charge sont connues, le module d'élasticité ME peut être établi.

Le sol du projet considéré est un sol cohérent, à granulométrie fine. La cohésion du sol sous le chalet a ainsi pu être augmentée de 0 kN/m<sup>2</sup> à 10–25 kN/m<sup>2</sup> jusqu'à une profondeur de -3.0 m. De plus, le module d'élasticité ME a été augmenté de 5 000 kN/m<sup>2</sup> à env. 13 500 kN/m<sup>2</sup>.

Grâce aux propriétés améliorées du sol, la portance du sol de construction a été considérablement augmentée. Avec une cohésion supplémentaire de 10 kN/m<sup>2</sup> déjà, il a été possible d'élever la portance du sol de 42 %. Avec une cohésion de 25 kN/m<sup>2</sup>, la portance du sol est même doublée. Grâce à l'amélioration du module ME, le sol est moins sujet à des tassements. De futurs tassements dus par exemple à une surcharge, suite à la surélévation d'un bâtiment, seront diminués de 63% dans les couches de 3 m d'épaisseur, améliorées par les injections. Les preuves selon Swisscode ont été apportées.

Lukas Berner, BSc ingénieur civil FHO