

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

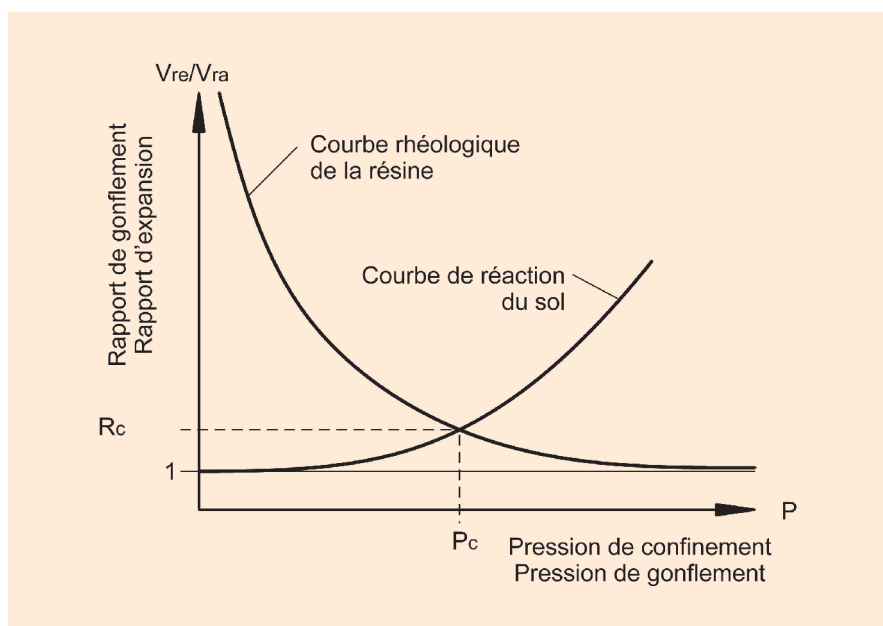
soit atteint. L'expansion effective R_c et la pression de gonflement P_c d'une injection sont ainsi déterminées.

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 σ'_h et la contrainte verticale σ'_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 ϕ' , 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

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

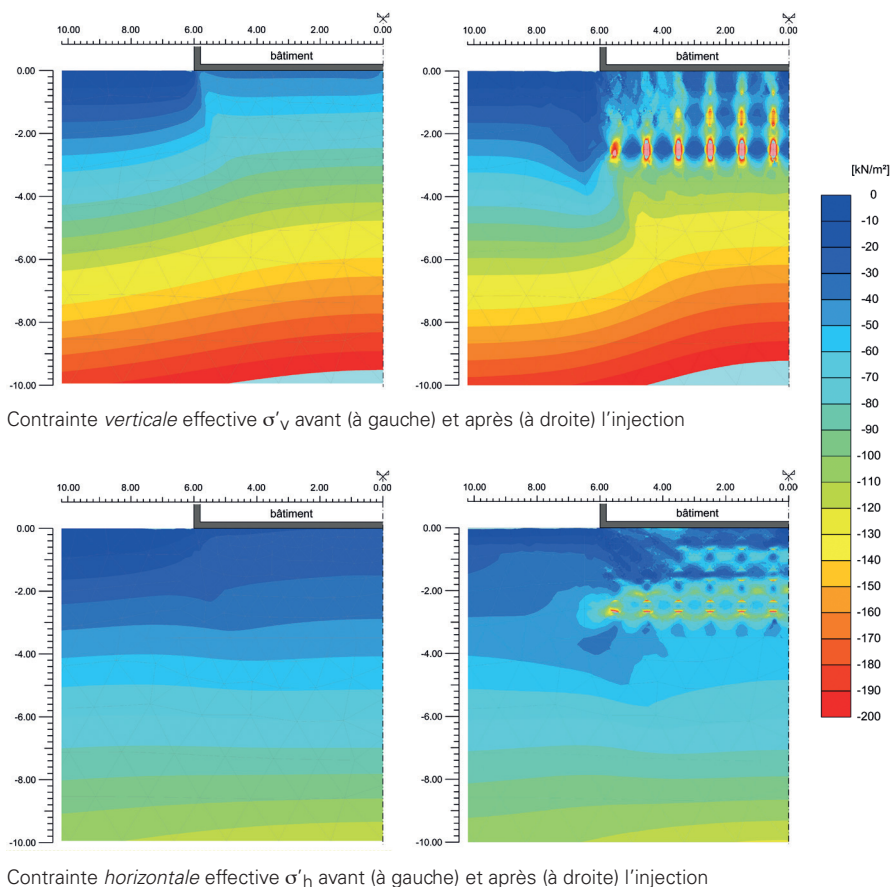
Formule 2: degré de surconsolidation OCR

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 augment à cause des angles de frottement ϕ'_{max} plus élevés.



Contrainte verticale effective σ'_v avant (à gauche) et après (à droite) l'injection

Contrainte horizontale effective σ'_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 ψ .

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

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/m² à 10–25 kN/m² jusqu'à une profondeur de -3.0 m. De plus, le module d'élasticité ME a été augmenté de 5 000 kN/m² à env. 13 500 kN/m².

Grâce aux propriétés améliorées du sol, la portance du sol de construction a été considérablement augmentée. Avec une cohésion supplémentaire de 10 kN/m² déjà, il a été possible d'élever la portance du sol de 42 %. Avec une cohésion de 25 kN/m², 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 diminuées 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