

Ein Berechnungs-Beispiel:

Ausgangslage

Ein rund 40-jähriges Chalet in Grindelwald wurde aufgrund von differentiellen Setzungen mithilfe von Injektionen von expandierendem Kunstharz angehoben. Vor dem Eingriff traten verstärkte Bewegungen am Haus auf. Eine Untersuchung der Hangstabilität kam zum Schluss, dass sich das Gebäude im Bereich einer aktiven Rutschung befindet. Die Rutschmasse bewegt sich etwa 50 bis 100 mm pro Jahr. Die differentiellen Setzungen konnten auf die ungleichmässigen Hangbewegungen zurückgeführt werden. Neben der Hebung des Bauwerks verbesserten die Injektionen auch die Bodeneigenschaften. Die Tragfähigkeit des Baugrundes wurde erhöht und die Setzungsempfindlichkeit verringert. Die Überprüfung der Verbesserung erfolgte mittels Rammsondierungen. Ein rechnerischer Nachweis nach Swisscode wurde nicht geführt. Deshalb wurde ein Vorschlag erarbeitet, wie für den verbesserten Baugrund der Nachweis erbracht werden kann.

Grundlagen zu expandierenden Kunstharzinjektionen

Das Kunstharz, welches für die Injektionen verwendet wird, besitzt die Fähigkeit, sich um ein Mehrfaches auszudehnen.

Durch die Expansion verdichtet sich der Boden im Injektionsbereich. Das Expansionsverhältnis (Endharz volumen V_{re} zu Anfangsharz volumen V_{ra}) beschreibt die Ausdehnung des Kunstharzes. Es ist vom Expansionsdruck P des Harzes abhängig. Der Expansionsdruck wird mit zunehmendem Expansionsverhältnis kleiner. Die Abhängigkeit kann durch eine empirische Beziehung beschrieben und grafisch als rheologische Kurve dargestellt werden.

Wie gross der erreichbare Expansionsdruck der Injektion ist, hängt von den Bodeneigenschaften und den Spannungen im Boden ab. Zur Berechnung muss die Reaktionskurve des Bodens ermittelt werden. Sie stellt den mittleren Grenzflächendruck (Druck an der Grenzfläche zwischen Injektion und Bodenmaterial) in Abhängigkeit zum Ausdehnungsverhältnis der Injektion dar. Mit zunehmender Expansion der Injektion erhöht sich der Grenzflächendruck. Wird die Reaktionskurve ins gleiche Diagramm wie die rheologische Kurve des Kunstharzes eingezeichnet, schneiden sich die beiden Kurven. Im Schnittpunkt herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen Grenzflächendruck und Expansionsdruck. Das Kunstharz dehnt sich

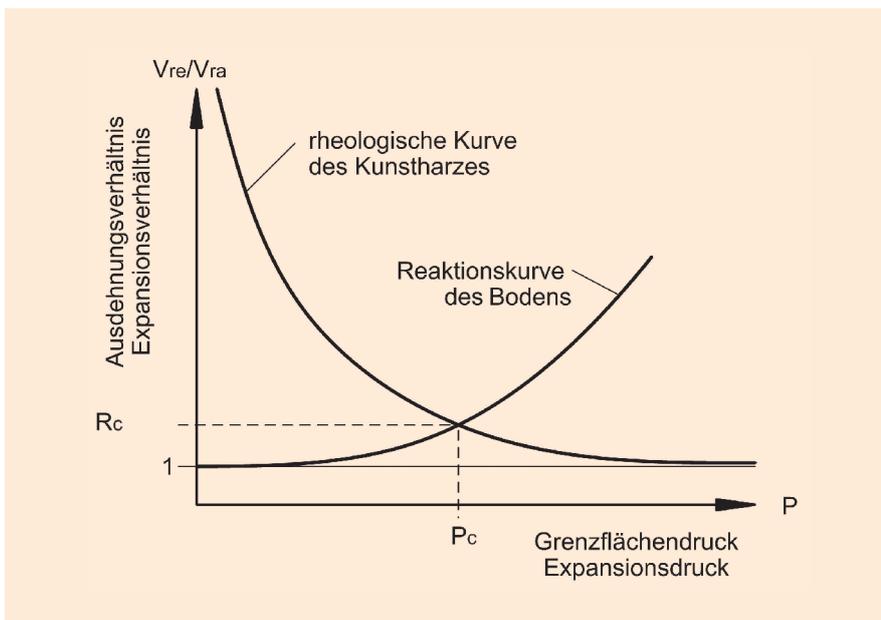
genau bis zum Erreichen dieses Gleichgewichts aus. So sind die effektive Expansion R_c und der Expansionsdruck P_c einer Injektion bestimmt.

Modellierung des betrachteten Projekts

Die Baugrundverbesserung am betrachteten Projekt wurde mithilfe eines einfachen numerischen Modells analysiert. Das zweidimensionale Modell wurde mit der Software Plaxis 2D erstellt. Es stellt einen Längsschnitt durch die 12.0 m lange Foundation dar. Der Untergrund besteht aus einer homogenen Bodenschicht von 10 m Stärke. Unterhalb der Foundation wurden kugelförmige Injektionen auf drei Ebenen (-0.50, -1.50 und -2.50 m ab OK Terrain) angesetzt. Die Injektionen sind in einem regelmässigen Raster mit 1 m Abstand zueinander angeordnet. Vereinfachend wurde eine ebene Geländeoberfläche modelliert. Die aktive Rutschung im Gebiet wurde nicht berücksichtigt.

Für jeden Injektionspunkt wurde eine Reaktionskurve erstellt. So konnten mithilfe der rheologischen Kurve des Kunstharzes das effektive Ausdehnungsverhältnis und der Expansionsdruck bestimmt werden.

Qualitatives Diagramm mit rheologischer Kurve des Kunstharzes und Reaktionskurve des Bodens



Spannungsänderungen im Boden

Vor der Injektion bestanden die Spannungen im Boden aus der Bodenüberlagerung und der Belastung durch das Gebäude. Durch die Injektionen wurden sowohl die vertikalen wie auch die horizontalen Spannungen erhöht (siehe Abbildungen rechts).

Quantifizierung der Baugrundverbesserung

Infolge der Injektionen wird der Boden überkonsolidiert. Überkonsolidierte Böden zeichnen sich dadurch aus, dass der Ruhedruckkoeffizient k_0 , das Verhältnis zwischen horizontaler Spannung σ'_h und vertikaler Spannung σ'_v , grösser ist als bei normal konsolidierten Böden. Wenn sich der Ruhedruckkoeffizient erhöht, ist der Überkonsolidierungsgrad OCR der einzige Parameter, der sich anpassen kann. Mit den bekannten Spannungen nach der Injektion und dem Reibungswinkel ϕ' des Bodens kann somit auf den Überkonsolidierungsgrad geschlossen werden.

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

Formel 1: Ruhedruckkoeffizient k_0

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

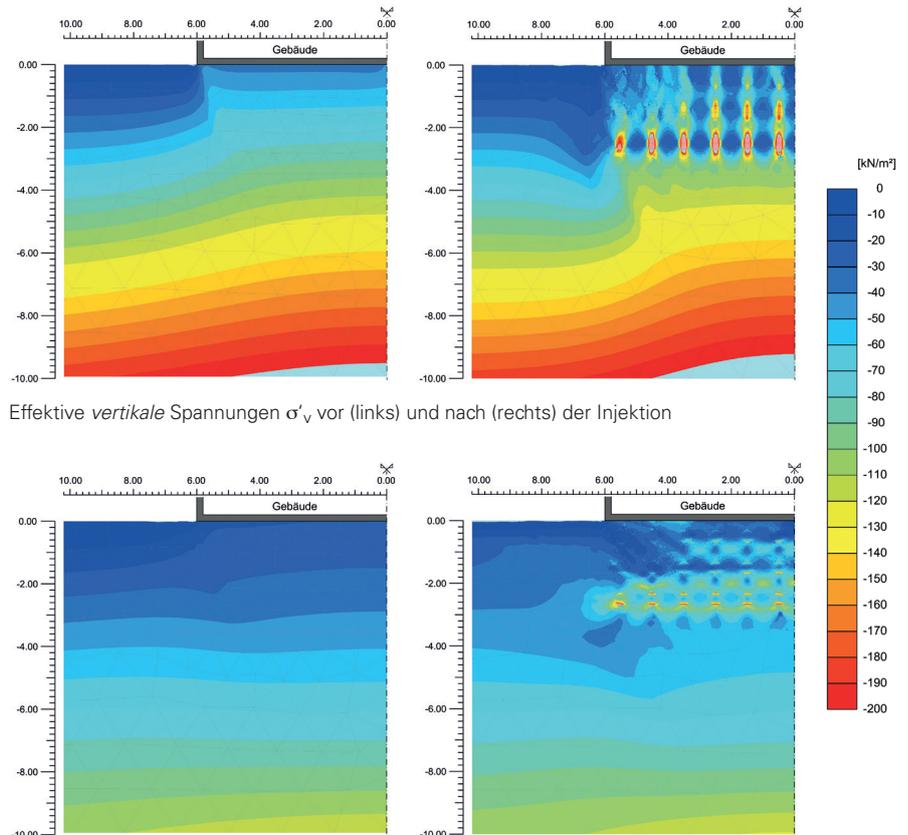
Formel 2: Überkonsolidierungsgrad OCR

Überkonsolidierte bindige Böden weisen typischerweise eine Kohäsion auf, in der die Überkonsolidierung «gespeichert» ist. Mit der Baugrundverbesserung durch expandierende Kunstharzinjektionen wird die Scherfestigkeit um diese Kohäsion erhöht. Für die Beziehung zwischen Überkonsolidierung und Kohäsion wurde eine Formel hergeleitet.

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

Formel 3: Kohäsion c' infolge Überkonsolidierung

Nichtbindige, grobkörnige Böden besitzen in der Regel keine Kohäsion. Jedoch wird die Scherfestigkeit infolge eines grösseren Reibungswinkels ϕ'_{max} erhöht. Durch die dichte Lagerung des



Effektive vertikale Spannungen σ'_v vor (links) und nach (rechts) der Injektion

Effektive horizontale Spannungen σ'_h vor (links) und nach (rechts) der Injektion

Bodens entsteht eine Verzahnung der Körner. Dieses Verhalten wird mit dem Dilatanzwinkel ψ quantifiziert.

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

Formel 4: Maximaler Reibungswinkel

Neben der Scherfestigkeit vergrössert sich auch der ME-Wert. Infolge der Überkonsolidierung und der Verdichtung verhält sich der Boden nach der Injektion wie bei einer Wiederbelastung. Sind die Steigungen der Erst- und Wiederbelastungsgeraden bekannt, kann der neue ME-Wert ermittelt werden.

Beim Boden des betrachteten Projekts handelt es sich um einen feinkörnigen, bindigen Boden. So konnte die Kohäsion des Bodens unter dem Chalet bis in eine Tiefe von -3.0 m ab OK Terrain von 0 kN/m² auf 10–25 kN/m² gesteigert werden. Zudem erhöhte sich der ME-Wert von 5 000 kN/m² auf ca. 13 500 kN/m².

Infolge der verbesserten Bodeneigenschaften konnte die Tragfähigkeit des Baugrunds erheblich gesteigert werden. Schon mit zusätzlichen 10 kN/m² Kohäsion wurde eine Erhöhung der Tragsicherheit um 42 % erreicht. Liegt die Kohäsion bei 25 kN/m², ist sogar eine Verdopplung möglich. Durch den verbesserten ME-Wert wurde der Boden unempfindlicher gegenüber Setzungen. Zukünftige Setzungen infolge von Mehrbelastungen, z.B. bei einer Aufstockung, werden in der verbesserten 3.0 m mächtigen Schicht um 63 % kleiner ausfallen. Die Nachweise nach Swisscode wurden erfüllt.

Lukas Berner, BSc Bauingenieur FHO

