



Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein

Österreichisches Nationalkomitee (im ÖIAV) der International Society  
for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ASSMGE)

# 8. Österreichische Geotechniktagung

mit „Vienna - Terzaghi Lecture“

## TAGUNGSBEITRÄGE

*3. und 4. Februar 2011*

**ÖIAV**  
GEGRÜNDET 1848

**ISBN-NR. 978-3-902450-01-2**

**HERAUSGEBER**

Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein  
A-1010 Wien, Eschenbachgasse 9  
Tel.: +43-1-5873536, Fax: +43-1-5873536-5  
Email: [office@oiav.at](mailto:office@oiav.at) URL: <http://www.oiav.at>

**DRUCK**

Novographic Druck GmbH  
Dr. Wolfgang Walluch  
Walter-Jurmann-Gasse 9, A-1230 Wien  
Tel.: 01/888 26 73, Fax: 01/888 26 33  
Email: [novographic@utanet.at](mailto:novographic@utanet.at), URL: <http://www.novographic.at>

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung, sowie der Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotografie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Medieninhabers reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. © 2011 Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Medieninhaber und Herausgeber: Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, alle: 1010 Wien, Eschenbachgasse 9

## Vorwort zur 8. Österreichischen Geotechniktagung

Der vorliegende Konferenzband zur 8. Österreichischen Geotechniktagung (8. ÖGT) enthält die „Vienna Terzaghi Lecture“ und 28 weitere Beiträge von Fachleuten aus dem In- und Ausland zum Tagungsthema „Bodenverbesserung – Hybridgründung – Tiefgründung“. Die schriftlichen Beiträge wurden nach einem internationalen Auswahlverfahren selektiert, womit eine hohe Qualität der Artikel gewährleistet werden sollte. Den externen Reviewern sei ein besonderer Dank für ihre Tätigkeit ausgesprochen. Für das Vortragsprogramm wurden 18 Beiträge zur mündlichen Präsentation für das Fachpublikum im Auditorium ausgewählt.

Die 8. Österreichische Geotechniktagung ist wiederum mit der Fachausstellung der VÖBU (Vereinigung Österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmen) gekoppelt, da sich diese Kooperation ausgezeichnet bewährt hat; darüber hinaus können auf diese Weise wertvolle Synergien zwischen Theorie und Praxis sowie zwischen Forschung und Anwendung erzielt werden.

In diesem Jahr widmet sich die ÖGT den unterschiedlichen Verfahren zur Gründung von Bauwerken, wobei die Vielfalt von Tiefgründungen, Hybrid- bzw. Kombinationsgründungen und die Bodenverbesserung aufzeigen soll, welche Möglichkeiten zur Bauwerksgründung bestehen, die Beschaffenheit des Untergrundes und die Interaktion zum Bauwerk berücksichtigend. Im Rahmen der „Vienna Terzaghi Lecture“ wird em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c.mult. Heinz Brandl über den Geotechnik-Ingenieur in der Gesellschaft berichten und uns an seiner langjährigen Erfahrung mit philosophischen Gedanken, Herausforderungen und Empfehlungen teilhaben lassen. Schlusspunkt der Tagung bildet eine Podiumsdiskussion mit hochkarätigen Vertretern von Bauherrschaft, Bauwirtschaft und Planung sowie Wissenschaft, Forschung und Lehre im Spannungsfeld des Themas der 8. Österreichischen Geotechniktagung.

Das Thema der Tagung soll vermitteln, dass praktisch jedes Verfahren der heute zur Verfügung stehenden breiten Palette von Bodenverbesserungsverfahren, Hybrid- bzw. Kombinations- und Tiefgründungen in der Wechselbeziehung von Boden und Bauwerk je nach baulichen bzw. untergrundbedingten Randbedingungen seine absolute Berechtigung besitzt. Ich darf Sie einladen, an dieser mittlerweile zur Tradition gewordenen Veranstaltung aktiv durch Diskussionsbeiträge mitzuwirken, sich im Kreise der Geotechniker und geotechnisch interessierten Fachkollegen auszutauschen und damit für zukünftige Aufgaben mit einem geschärften Bewusstsein für die Wahl des richtigen Gründungskonzeptes hervorzugehen.

Die 9. Österreichische Geotechniktagung ist für Anfang 2013 geplant. Sie wird wiederum in Kooperation mit der VÖBU stattfinden und mit einer umfassenden Fachausstellung gekoppelt sein. Die Veranstalter hoffen weiterhin auf rege Beteiligung und laden das interessierte Fachpublikum aus dem In- und Ausland schon jetzt herzlich zur Teilnahme ein.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam  
Geschäftsführer des Österreichischen Nationalkomitees der ISSMGE



# Inhalt

## VIENNA-TERZAGHI LECTURE

Der Geotechnik-Ingenieur in der Gesellschaft: Philosophische Gedanken, Herausforderungen und Empfehlungen <i>H. Brandl</i> .....	9
---	---

## TIEFGRÜNDUNG

Sava Bridge Belgrad – Eine innovative Pylonfundierung für eine spektakuläre Schrägseilbrücke <i>B. Hinterplattner, R. Markiewicz, D. Adam, B. Schweighofer</i> .....	47
Schlitzwandschächte - Baugruben des Rheinkraftwerkes Iffezheim <i>T. Wieczorek, J.-D. Deix</i> .....	59
Tiefgründung bei Sulfatkarst - Bohrpfahlgründung beim Neubau des Erlebnisbades Ehrenberg in Reutte <i>J. Henzinger, Ch. Henzinger, P. Hoffmann</i> .....	73
Pile HAY-Proof-System (Pile H-P-S) - Neuartiges System für statische Probelastungen an schlanken Pfählen <i>M. Hayden, T. Kirchmaier</i> .....	87
Möglichkeiten zur Tragfähigkeitserhöhung von Großbohrpfählen <i>St. Berger</i> .....	99
Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung von Tiefgründungen <i>R. Hofmann, M. Fross</i> .....	113
Panoramahaus Dornbirn - Pfahlgründung in begrenzt mächtiger Lasteinleitungszone <i>K. König, M. Mehlführer</i> .....	125
Stand der Technik beim Doppelkopfborenen - Erfahrungen aus der Praxis <i>M. Schönit, A. Stroppa, K. Hudelmaier</i> .....	135
Pylon foundation of a cable stayed bridge at the motorway ring road of Wrocław <i>E. Dembicki, M. Cudny, A. Krasieński, K. Załęski</i> .....	147

## KOMBINATIONSGRÜNDUNGEN + HYBRIDGRÜNDUNG

Planung von tiefen Baugruben und Kombinierten Pfahl-Plattengründungen unter innerstädtischen Randbedingungen <i>H. Quick, S. Meißner, B. Cronen</i> .....	159
Optimierung einer kombinierten Pfahl-Plattengründung mit einem nichtlinearen Berechnungsmodell mit Berücksichtigung von Pfahlherstellungseinflüssen <i>J. Grabe, T. Pucker, Ph. Busch</i> .....	171
Hybridgründungen im Rahmen einer DSV-Tiefgründung <i>L. Martak, R. Hofmann, H. Zehentner</i> .....	185
3D Finite Elemente Berechnungen zur Setzungsprognose der Überbauung Wien-Mitte <i>F. Tschuchnigg, H. F. Schweiger, A. Vorwagner</i> .....	199

Hybridgründung - Bodenverbesserung und Tiefgründung Fallbeispiel Kraftwerk Malzenice in der Slowakei <i>I. Paulmichl, D. Adam</i> .....	211
---	-----

Geozellen stabilisierte Lastverteilungsschichten über CMC-Säulen <i>N. Meyer, A. Emersleben</i> .....	231
--	-----

## **BODENVERBESSERUNG**

Zum Langzeitverhalten von Gründungen mit geokunststoffummantelten Säulen <i>V. Küster, M. Raithel, D. Alexiev</i> .....	245
--	-----

Zur numerischen Modellierung von Bodenverbesserungsverfahren: Vibrationswalze, Impulsverdichter, Rüttelbohle und Rütteldruckverdichtung <i>J. Grabe, S. Henke, T. Hamann</i> .....	259
--	-----

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Wirkung des Impulsverdichters <i>Ch. Adam, D. Adam, F.-J. Falkner, I. Paulmichl, J. Fürpaß</i> .....	271
--	-----

Numerische Back-Analysis von Verdichtungsinjektionen <i>U. Arslan, A. Anthogalidis</i> .....	285
---	-----

Numerische Berechnung der Bodenverbesserung durch Verdrängungsinjektionen <i>E. Schuller, G. Pittino</i> .....	299
---	-----

Entwicklung der Tiefenverdichtung - Von der händischen Datenaufzeichnung zur automatischen Visualisierung <i>E. Falk, A. Zöhrer, G. Strauch</i> .....	309
---	-----

Abdichtung und Erweiterung eines Hochwasserschutzdammes unter Verwendung des angefallenen und in-situ vergüteten Dichtwandaushubs <i>M. Heymann, W. R. Linder, Ch. Scholz</i> .....	321
---	-----

Baustraßen und Arbeitsebenen auf extrem weichem Untergrund – baubetriebliche Anforderungen und planerische Lösungen <i>L. Vollmert, A. Post</i> .....	333
---	-----

## **SONSTIGE THEMEN AUS DER GEOTECHNIK**

Stabilisierter Thermosand als fließfähiges Bettungsmaterial mit guten Wärmedämmeigenschaften für Fernwärmeleitungen <i>O. Leibniz</i> .....	349
---	-----

Study of new construction impact on existing buildings <i>A. Ponomaryov, S. Kaloshina</i> .....	361
--	-----

Sacken der Fußbodendecke einer großen Verkaufshalle und ihre Sanierung <i>G. Stefanoff, J. Jellev, A. Totsev</i> .....	369
---	-----

Deformationsmessungen mit Time Domain Reflectometry (TDR) zur Hangbewegungs- und Bauwerksüberwachung – Möglichkeiten und Grenzen <i>J. Singer, K. Thuro, U. Sambeth, R. Stump</i> .....	377
---	-----

# Numerische Berechnungen der Bodenverbesserung durch Verdrängungsinjektionen

Dipl.-Ing. Erik SCHULLER  
Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard PITTINO  
Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben

## KURZFASSUNG

Beim Verfahren der Verdrängungsinjektion wird Injektionsgut unter Druck in den Baugrund eingebracht, um den die Injektion umgebenden Boden zu verdrängen und zu verformen. Dabei kommen zwei in ihrem Wirkprinzip geringfügig unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Die Kompaktions- bzw. Verdichtungsinjektionen verwenden ein hochviskoses Injektionsgut, das sich beim Einpressen wie ein wachsender Festkörper verhält. Hingegen verwenden hydraulische Aufbrechinjektionen geringere viskose Injektionsmittel. Der Druck in einem mit Packern abgetrennten Bereich eines Bohrlochs wird über den Umgebungsdruck gesteigert. Wird die meist geringe Zugfestigkeit des Baugrundes überschritten, bilden sich mit Injektionsgut gefüllte hydraulische Risse aus.

In diesem Beitrag werden verschiedene Methoden der numerischen Modellierung von Verdrängungsinjektionen mittels FLAC, einer Software der Itasca Consulting Group, vorgestellt, das Ansetzen von Injektionsdrücken (apply pressure) an der Wandung, sowie die Methode den Injektionszonen Spannungszustände zuzuweisen. Ergebnisse einer 3D-Berechnung eines oberflächennahen Tunnelvortriebs werden vorgestellt.

## 1. EINLEITUNG

Die zwei- und dreidimensionale numerische Modellierung von Problemstellungen in der Geotechnik ist heutzutage ein verbreitetes Hilfsmittel zur Analyse und Dimensionierung von geotechnischen Bauwerken und untertägigen Hohlraumbauten. Gefördert wird dies durch die rasche Entwicklung der Rechenleistung von Computern und durch die immer größere Anzahl an spezieller benutzerfreundlicher Software. Auch die Injektionstechnik hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt. Eine Vielzahl von Verfahren mit verschiedenen Wirkprinzipien wurde für unterschiedlichste Anwendungen entwickelt. Im weitesten Sinn wird unter Injizieren in der Geotechnik das Einbringen von Flüssigkeiten in Hohlräume des Baugrunds verstanden. Prinzipiell sind Injektionen im Fels und Injektionen im Lockergestein zu unterscheiden. Weiters werden die Injektionsverfahren in Verfahren ohne Baugrundverdrängung (Poreninjektionen, Kluftinjektionen, Hohlraumverfüllungen) und Verfahren mit Baugrundverdrängung (Verdichtungsinjektionen, hydraulische Aufbrechinjektionen) eingeteilt. Das Ziel von Injektionsmaßnahmen ist eine Verfestigung und/oder Abdichtung des Baugrunds. Neben einer Baugrundverbesserung werden Injektionen auch zur Kompensation von vortriebsinduzierten Setzungen oberflächennaher Tunnelbauwerke ausgeführt. Vor allem bei einer Bebauung innerhalb des Einflussbereichs eines Tunnels sind Setzungen nur in einem sehr geringen Umfang zu tolerieren.

Kompensations- bzw. Hebungsinjektionen stellen eine Möglichkeit dar, um unzulässige hohe Setzungen zu reduzieren und dadurch Bauwerksschäden zu verhindern.

### **1.1. Verdrängungsinjektionen**

Verdrängungsinjektionen sind Verfahren, bei denen ein Injektionsgut unter Druck in den Baugrund eingebracht wird, um den die Injektion umgebenden Boden zu verdrängen und zu verformen. Dabei kommen zwei in ihrem Wirkprinzip geringfügig unterschiedliche Verfahren zur Anwendung:

Die Kompaktions- bzw. Verdichtungsinjektionen sind nach ÖNORM EN 12715 [2001] „Injektionsverfahren mit Verdrängung des Baugrundes zu dem Zweck, Mörtel mit hoher innerer Reibung in den Boden zu pressen, um den Boden zu verdichten, ohne ihn aufzubrechen.“. Für Kompaktionsinjektionen wird ein vergleichsweise hoch viskoses, mörtelähnliches Injektionsgut unter hohem Druck verwendet. Die Konsistenz ist so beschaffen, dass das Injektionsgut nahezu homogen bleibt und von der Austrittsquelle nicht weiter in den Baugrund eindringt oder diesen hydraulisch aufbricht [Warner, 2004]. Das Injektionsgut verhält sich beim Einpressen wie ein wachsender Festkörper (growing solid). Verdichtungsinjektionen werden unter anderem zur Verbesserung locker bis mitteldicht gelagerter nichtbindiger Böden eingesetzt.

Hydraulische Aufbrechinjektionen (Clauage) andererseits verwenden geringer viskose Injektionsmittel. Dabei wird der Innendruck eines Hohlraumes, z.B. ein mit Packern abgetrennter Bereich eines Bohrlochs, über den Umgebungsdruck gesteigert. Beim Überschreiten der meist geringen Zugfestigkeit des Baugrundes bilden sich die ersten mit Injektionsgut gefüllten Risse. Die Risse entwickeln sich in Richtung der größten Hauptnormalspannung im Baugrund und sind normal auf die kleinste orientiert. Dies führt bei der Erstverpressung bei normalkonsolidierten Böden zu tendenziell vorwiegend vertikalen Injektionslamellen und zu einer horizontalen Verspannung. Dadurch verändert sich der Spannungszustand im Boden. Die ursprünglich kleinste Hauptnormalspannung wird infolge der von den ersten Rissen verursachten Bewegung erhöht. Wird nochmals verpresst, orientieren sich die nun folgenden Risse gemäß des aktuellen Spannungszustandes im Baugrund. Zu den bereits vorhandenen vertikalen Injektionslamellen bilden sich zunehmend auch horizontale Lamellen aus und der Boden wird horizontal und vertikal verspannt. Neben einer weiteren Verdichtung treten bereits in diesem Stadium tendenziell Hebungen auf. Bei einer weiteren Verpressung bilden sich gemäß der jeweils vorherrschenden Spannungsverhältnisse zusätzliche Injektionslamellen in dem bereits stabilisierten und gleichmäßigten Baugrund [Pregl, 1991]. Wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt, kommt es im Nahbereich der Injektion zur Ausbildung eines hydrostatischen Spannungszustandes, da sich mit jeder Nachverpressung die jeweils kleinste Hauptnormalspannung vergrößert. Die Folge ist ein dreidimensional weit verzweigtes Netz von mit Injektionsgut gefüllten Rissen, die den den Injektionsbereich umgebenden Boden isotrop verdrängen. Je nach Ausmaß der Volumenänderung und Teufenlage der Injektionszone kann dies zu Hebungen an der Geländeoberfläche führen.



## 2. NUMERISCHE MODELLIERUNG VON VERDRÄNGUNGSINJEKTIONEN

### 2.1. Modellierungsansätze

Für die Modellierung der Verdrängungsinjektionen wurde das Finite-Differenzen-Programm FLAC [Itasca Consulting Group, 2005] verwendet. Damit wurden unterschiedliche Ansätze untersucht. In einem ersten Modell wurden die Netzknotenpunkte, die die festgelegten Injektionszonen begrenzten, mit Hilfe des Befehls „Apply Velocity“ direkt bewegt und dadurch den Zonen eine Verformung aufgezwungen. Dieser Ansatz führte aber zu Spannungsspitzen an den Eckpunkten der Injektionszonen, die sich nicht ohne Einfluss auf die Auswirkungen einer Injektion kontrollieren ließen. Auch waren mit diesem Ansatz nur sehr grobe Manipulationen möglich. Bei einem weiteren Ansatz wurden die Injektionszonen mit dem Befehl „Modell Null“ aus dem Berechnungsnetz entfernt und der Injektionsdruck mit „Apply Pressure“ am Umriss der Injektionszonen als innere Randbedingung aufgebracht. Mit diesem Ansatz wurden zwar den Randbedingungen angepasste Deformationen im Modell erzielt, jedoch konnte den fehlenden Injektionszonen kein Materialgesetz mehr zugewiesen werden. Dadurch war eine Modellierung der Injektionszonen mit realen Materialeigenschaften nicht möglich.

Der für die gegenständlichen Untersuchungen schlussendlich gewählte Ansatz für die Modellierung der Injektionen weist den im Berechnungsnetz festgelegten Injektionszonen isotrope Spannungszustände d.h. einen hydrostatischen Injektionsdruck zu. In ähnlicher Weise wurden Hebungsinjektionen von Buchet & Van Cotthem [1999] modelliert. Zunächst werden die erforderlichen Materialparameter der Injektionszonen festgesetzt. Die anschließende Zuweisung eines isotropen Drucks, der höher als der Umgebungsdruck ist, führt zu einem Ungleichgewicht zwischen den Injektionselementen und den diese Elemente umgebenden Zonen. Durch den Überdruck in den Elementen dehnen sie sich bei gleichzeitigem Abfall der Spannung solange aus, bis ein neues Gleichgewicht erreicht wird. Dabei spielt die Steifigkeit der Elemente eine wichtige Rolle. Dieser Vorgang lässt sich solange wiederholen, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Als Abbruchkriterium können z.B. ein bestimmtes Injektionsvolumen, ein bestimmter konstanter Injektionsdruck, eine maximale Spannung in einem der Nachbarelemente oder eine geforderte Oberflächenverformung festgelegt werden. Die Druckzuweisung erfolgt mit Hilfe des „Inital“-Befehls, entweder jeweils nach Erreichen des Gleichgewichts oder mit jedem Berechnungsschritt. Für eine stabile Berechnung sind jedoch nur kleine Druckzuwächse in einem einzelnen Berechnungsschritt erlaubt. In den Modellen wird deshalb der Injektionsdruck inkrementiell erhöht und ein maximal zulässiger Injektionsdruck festgelegt. Die stetige Zuweisung des Injektionsdrucks erfolgt mit Hilfe der in FLAC implementierten Programmiersprache FISH und wird in Abhängigkeit der sogenannten „Unbalanced Force“ gesteuert.

Für Verdichtungsinjektionen, bei denen eine hydraulische Rissbildung durch die hohe Viskosität des Injektionsgutes verhindert wird, werden die Vorgänge um eine Injektion im Kleinen gut wiedergegeben. Die Berücksichtigung des Aushärtens des Injektionsgutes erfolgt nach dem Injizieren durch Zuweisung entsprechender Materialparameter. Können alle Injektionsbohrlöcher im Detail modelliert werden, wird eine wirklichkeitsnahe Verformung des Baugrunds erreicht und die Modellierung des Injektionsvorganges nur durch die maximal mögliche Verzerrung des Berechnungsnetzes begrenzt. Die dafür erforderliche Netzfeinheit

kann zu sehr großen und nicht mehr mit vertretbarem Aufwand handhabbaren Modellen führen. Deshalb wird bei Modellen größeren Maßstabs nicht mehr jedes Bohrloch im Detail berücksichtigt sondern ein größerer Bereich um die Bohrlöcher als Injektionszonen festgelegt. Diese Berechnungszonen setzen aber konstante Spannungen innerhalb einer Zone voraus. Somit ist ein gewichteter Druck zuzuweisen, der nicht mehr dem realen Injektionsdruck entspricht.

Für die Modellierung von Aufbrechinjektionen ist ebenfalls die Einführung von relativ großen, von Injektionen beeinflussten Bereichen erforderlich, da die Mikrovorgänge bei der hydraulischen Rissbildung mit der Kontinuumsmechanik nicht darstellbar sind. Die Ausdehnung des räumlichen Netzes der Injektionslammellen muss abgeschätzt und damit die numerischen Injektionszonen festgelegt werden. Hebungsinjektionen werden nach Buchet & Van Cotthem [1999] durch eine Volumendehnung der Elemente, in denen sich die Injektionspunkte befinden, mit der Zuweisung eines anisotropen Drucks modelliert. Weitere Ansätze wurden von Kummerer [2003] ausführlich beschrieben. Die weiteren Ausführungen beschränken sich aber auf den Ansatz wie für die Kompaktionsinjektionen.

## 2.2. Energiebilanz des Injektionsvorgangs

Einen weiteren Vorteil der Modellierung durch Injektionsdruckzuweisung stellt die Energiebilanz des Injektionsvorganges dar. Jede Injektion führt dem Baugrund Energie zu. Diese ist erfassbar und für ein linear-elastisches Material gelten die Prinzipien der Formänderungsarbeit [Hahn, 1985]. Mit dem Hook'schen Gesetz in volumetrischer Schreibweise ergibt sich:

$$\Delta E_{el} = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \Delta P \cdot \frac{\Delta P}{K} = \frac{V \cdot \Delta P^2}{2 \cdot K} \quad (1)$$

Dabei ist  $V$  das Volumen des Injektionskörpers,  $\Delta P$  der Injektionsdruck und  $K$  der Kompressionsmodul des Injektionsgutes. Die mit jedem Berechnungsschritt in die Injektionszonen zugeführte Energie kann somit erfasst und mit den realen Injektionsdaten (Injektionsmenge, Injektionszeit, Injektionsdruck, ....) verglichen werden. Zu beachten ist, dass die zugeführte Energie umgekehrt proportional dem Kompressionsmodul  $K$  des Injektionsgutes ist. Stellt man die zugeführte Energie eines Injektionsvorganges der geleisteten Hebungsarbeit (Erhöhung der potentiellen Energie) gegenüber, so ergeben sich große Unterschiede. Ein je nach Einspannung mehr oder weniger großer Anteil der zugeführten Energie geht in elastische und plastische Verformungen (Formänderungsarbeit) des umgebenden Bodens. Mit FLAC kann die Änderung der potentiellen Energie des Systems mit einer Abfrage über alle Elemente berechnet werden. Mit dem Verhältnis von potentieller zu zugeführter Energie lässt sich auch eine Art Wirkungsgrad des Injektionsvorganges definieren.

## 2.3. 2D-Modell einer Verdrängungsinjektion

Anhand eines einfachen 2D-Modells wurden die Auswirkungen einer Verdrängungsinjektion im Baugrund untersucht. Das Modell wurde in Relation zur Größe der Injektionszone sehr groß gewählt, um Randeinflüsse zu vermeiden. Zusätzlich wurde für die Berechnung der „Large-strain Solution Mode“ aktiviert, wodurch die Koordinaten der Netzknotenpunkte mit

den Deformationen während der Berechnungen laufend aktualisiert wurden und somit die Berechnungen am verformten System erfolgten. In einem allseitig eingespannten Berechnungsnetz (Abb. 1) wurde ein Bohrloch unter Innendruck gesetzt.

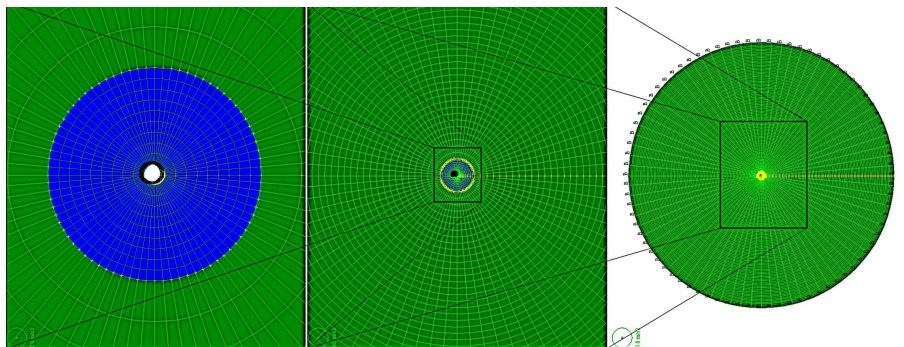


Abb. 1: Berechnungsnetz für ein Bohrloch unter Innendruck (blau, grün das umgebende Material)

Für die ersten Modelle wurde zunächst ein linear elastisches Materialgesetz verwendet. Der sich ergebende Spannungszustand um das Bohrloch entspricht der Lösung der bekannten Kirsch-Gleichungen für eine unendlich ausgedehnte, gelochte Scheibe unter Innendruck. Die Verwendung eines linear elastischen Materialgesetzes ist aber nur bedingt zur Beschreibung des Verhaltens von Böden geeignet, daher wurden weitere Untersuchungen mit dem Mohr-Coulomb'schen Materialgesetz durchgeführt. Wird der Baugrund elastoplastisch mittels Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium beschrieben, plastifizieren alle Zonen um ein Bohrloch unter Innendruck (Abb. 2). Die an die Injektion angrenzenden Zonen werden komprimiert und verformt. Die Erhöhung der Steifigkeit durch diese Kompaktion des Bodens lässt sich bei der Verwendung des Mohr-Coulomb'schen Materialgesetzes nur qualitativ berücksichtigen und muss für eine angenommene Steifigkeit manuell auf den neuen, erhöhten Wert gesetzt werden.

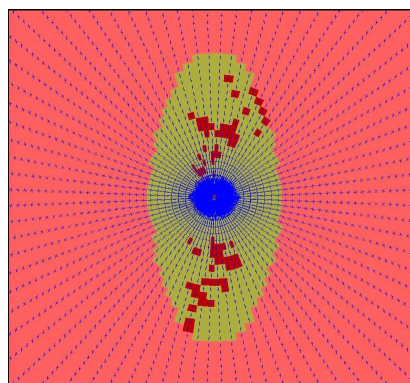


Abb. 2: Plastifizierte Zonen um ein Injektionsbohrloch nach Mohr-Coulomb'schem Bruchkriterium (beige und rot), nicht plastifizierte Zonen hellrot

Die Materialgesetze Modified Cam-Clay und Double-Yield [Pittino & Golser, 2004] sind hingegen in der Lage eine Erhöhung der Steifigkeit des Baugrunds infolge Verdichtung zu beschreiben. Diese ermöglichen eine Anpassung der Steifigkeit in Abhängigkeit der Spannung bzw. des Spannungspfades. Berechnungen einer einzelnen Bohrlochinjektion in einem Modified Cam-Clay Material mit FLAC führten zu den erwarteten Ergebnissen. Der Bereich unmittelbar um das Bohrloch wird verdichtet, was zu einer Erhöhung der Steifigkeit führt. Ein höherer Druck im Bohrloch vergrößert seine Ausdehnung und führt zu ähnlichen

aber größeren spannungsbeeinflussten und verdichteten Bereichen. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines größeren Berechnungsnetzes, als für ein einzelnes Injektionsbohrloch erforderlich, gerechtfertigt.

### 3. NUMERISCHE MODELLIERUNG EINES SEICHTLIEGENDEN TUNNELVORTRIEBS

#### 3.1. Setzungen infolge eines Tunnelvortriebs

Jeder oberflächennahe Tunnelvortrieb verursacht mehr oder weniger starke Setzungen der Geländeoberfläche (Abb. 3). Deshalb sind vor allem in bebauten Gebieten setzungsreduzierende Maßnahmen erforderlich. Anzustreben wäre deshalb ein möglichst steifer und früh tragender Ausbau mit hoher Festigkeit, was aber den Prinzipien der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode widerspricht [Pacher, 1964].

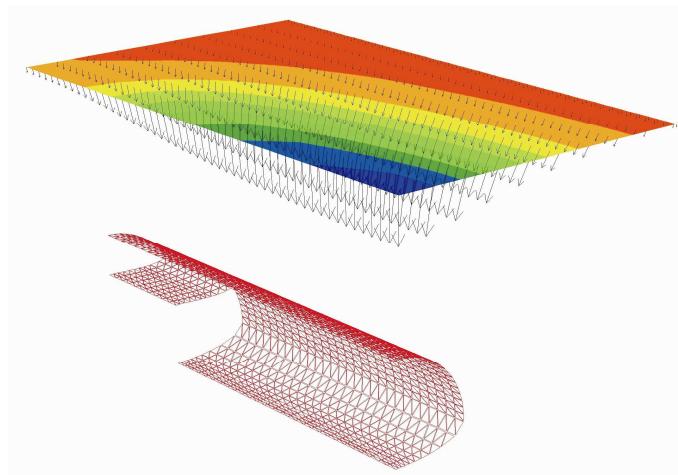


Abb. 3: Setzungsmulde der Geländeoberfläche infolge Tunnelvortrieb; Kontur- und Vektorplot [Gimpel, 2006]

Die Verschiebung der Geländeoberfläche erfolgt nicht nur in vertikaler, sondern auch in horizontaler Richtung. Diese horizontalen Anteile machen mit dem Ortsbrustdurchgang teilweise recht komplexe Richtungsänderungen durch [Stelzer, 2004]. Diese können durch Zerrungen ebenfalls Bauwerksschäden verursachen. Die Hauptursache für Bauwerksschäden stellt aber die Schiefstellung infolge unterschiedlicher vertikaler Verschiebungen (Setzungsdifferenzen) des Baugrundes dar. Die Setzungen quer zur Tunnelachse lassen sich meist durch Glockenkurven nach Gauß approximieren [Peck, 1969]. Sowohl analytische und numerische Berechnungen als auch Messwerte zeigen ein einheitliches Erscheinungsbild. Beim Setzungsverlauf in Tunnellängsrichtung hingegen wird bezogen auf den Stand der Ortsbrust zwischen vorausgehenden und nachfolgenden Setzungen unterschieden. Die vorausgehende Setzung beträgt dabei typischerweise etwa ein Drittel der Gesamtsetzung, was aber je nach Randbedingungen stark variieren kann.

Die grundsätzlichen Einflussparameter für das Ausmaß der Endsetzungen, unter der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens, sind die Steifigkeit des Baugrundes, der Tunnelquerschnitt in Größe und Geometrie, die Steifigkeit der Tunnelschale und die

Abschlagslänge. Die Form der Setzungsmulde wird schon bei dieser starken Vereinfachung von mehreren Faktoren beeinflusst. Ein mögliches Plastifizieren sowie Zeitabhängigkeiten im Verhalten des Baugrundes (Konsolidierung) und der Tunnelschale (Hydratation) verkomplizieren diese Zusammenhänge.

### 3.2. Anordnung der Injektionszonen

Üblicherweise werden Hebungsinjektionen horizontal oder leicht geneigt und fächerförmig oberhalb eines aufzufahrenden Tunnels angeordnet. Dadurch kann bereits vor dem Vortriebsbeginn durch Injizieren eine Verbesserung und Stabilisierung des Baugrunds erzielt werden. Die Injektionsbohrungen können unter anderem von Schächten, von Baugruben oder von anderen nahen Tunnelbauwerken aus hergestellt werden.

Das Ziel der gegenständlichen numerischen Berechnungen ist es, eine mögliche Alternative zu den traditionell zur Setzungsreduzierung verwendeten Verfahren vorzuschlagen. Im Unterschied zu der oben erwähnten Vorgehensweise werden die untersuchten Injektionsmaßnahmen vom Tunnel aus, einige wenige Meter hinter der Ortsbrust durchgeführt. Die Injektionszonen sind in Reihen radial nach außen angeordnet (Abb. 4). Da die Injektionen in alle Richtungen und so auch in Richtung des Tunnels wirken, muss zwischen den Injektionszonen und der Schale ein Abstand eingehalten werden, um hohe punktuelle Beanspruchungen der Tunnelschale zu vermeiden.

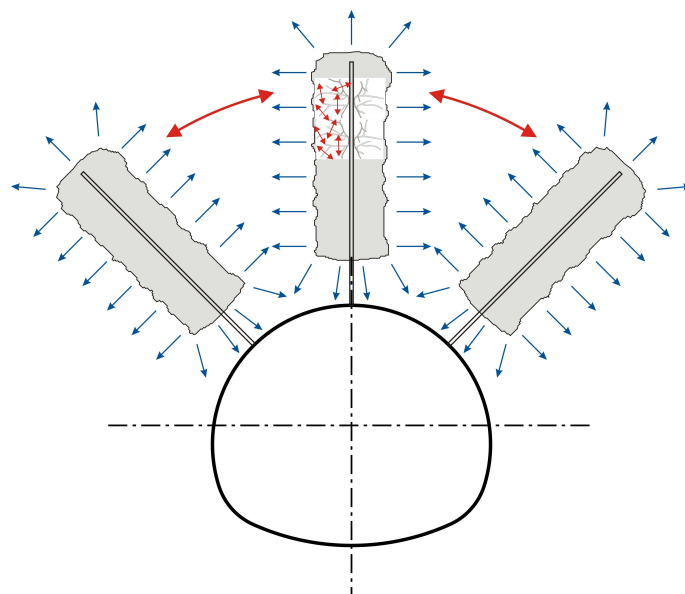


Abb.4: Anordnung der Injektionszonen (Prinzipsskizze)

### 3.3. Numerische Modelle

Zunächst wurde die Wirkungsweise der Injektionsmaßnahmen in der oben beschriebenen Anordnung anhand eines zweidimensionalen Modells untersucht. Ein Tunnel mit 25 m Überlagerung und einer 35 cm starken Spritzbetonschale wurde modelliert. In diesem Modell wurden die Größe und Anordnung der Injektionszonen über weite Bereiche variiert. Für die vorab durchgeführten Untersuchungen wurde vereinfachend der Baugrund und die Tunnelschale elastoplastisch mittels Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium beschrieben. Die steife Spritzbetonschale wurde nach dem Ausbruch im Modell sofort aktiviert.

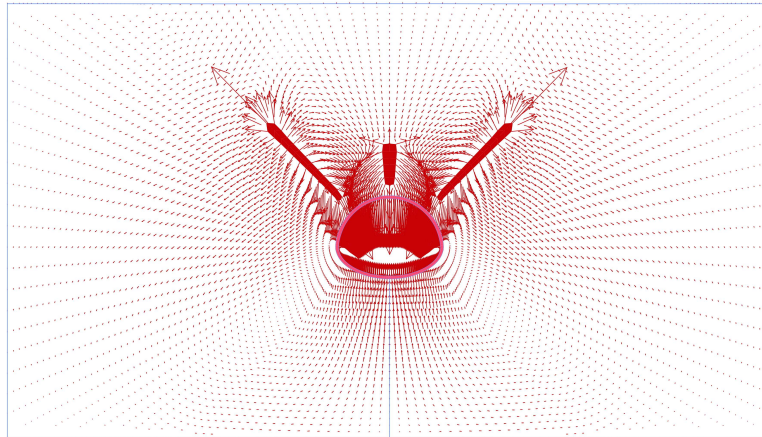


Abb. 5: Verschiebungen infolge der Injektionsmaßnahmen; Vektorplot

Anschließend wurden die Berechnungen an dreidimensionalen Modellen durchgeführt, um auch die Verschiebungen vor der Ortsbrust darstellen zu können. Modelliert wurde ein Kalotten-Strossen Vortrieb eines Tunnels mit einer Überlagerungshöhe von 13 m, einer Querschnittsfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> und einem Kalottenvorlauf von 10 m. Die Spritzbetonschale wurde mit zweidimensionalen Shell-Elementen modelliert. Ihre Steifigkeit wurde dem Vortriebsstand angepasst, um die Aushärtung des Spritzbetons zu berücksichtigen. Der Baugrund wurde mit dem Double-Yield Materialgesetz beschrieben. Die Injektionszonen waren in Ebenen normal zur Tunnelachse radial mit einem Abstand von 3 m von der Spritzbetonschale, in drei bzw. fünf Reihen für das Vollprofil angeordnet (Abb. 6). Ihr Abstand in Tunnellängsrichtung betrug 2 m.

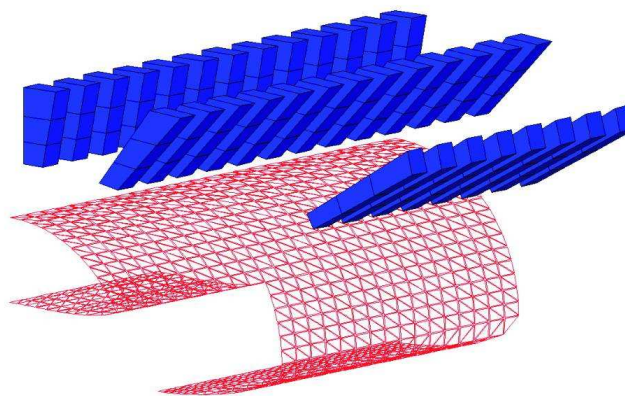


Abb. 6: Anordnung der Injektionszonen und Geometrie des Kalotten-Strossen Vortriebs

### 3.4. Ergebnisse der Berechnungen

Durch die untersuchten Injektionsmaßnahmen lassen sich Verschiebungen im Nahbereich eines Tunnels induzieren. Die Verschiebungen in Richtung des Tunnels verursachen dabei zusätzliche Konvergenzen und dadurch eine höhere Beanspruchung der Tunnelschale. Durch die Verwendung von linear-elastischen Shell-Elementen zur Modellierung wurde ein eventuelles Versagen der Schale nicht untersucht. Bei nicht zu nahe am Ausbruchsrund liegenden Injektionen verteilen sich die zusätzlichen Spannungen an der Schale ausreichend

und zu hohe punktuelle Beanspruchungen der Schale werden dadurch verhindert. Oberhalb der Injektionszonen kommt es zu Hebungen.

Die Untersuchungen ergaben, dass die Injektionen, die einige wenige Meter hinter der Ortsbrust radial angeordnet sind, auch die vorausgehenden Setzungen beeinflussen. Um diesen Setzungsanteil besser kompensieren zu können, wurde in zwei Phasen injiziert, das erste Mal kurz nach Einbau der Kalottenschale etwa 4 m hinter der Ortsbrust, das zweite Mal nach dem Ausbruch der Strosse. Für das untersuchte Modell wurde deutlich mehr Nachinjiziert, als zur Kompensation der Setzungen infolge des Tunnelvortriebs erforderlich ist, um die Wirkung der untersuchten Injektionsmaßnahmen zu verdeutlichen (Abb. 7). Für eine möglichst ebene Geländeoberfläche sind immer mehrere Injektionen in einem Querschnitt erforderlich.

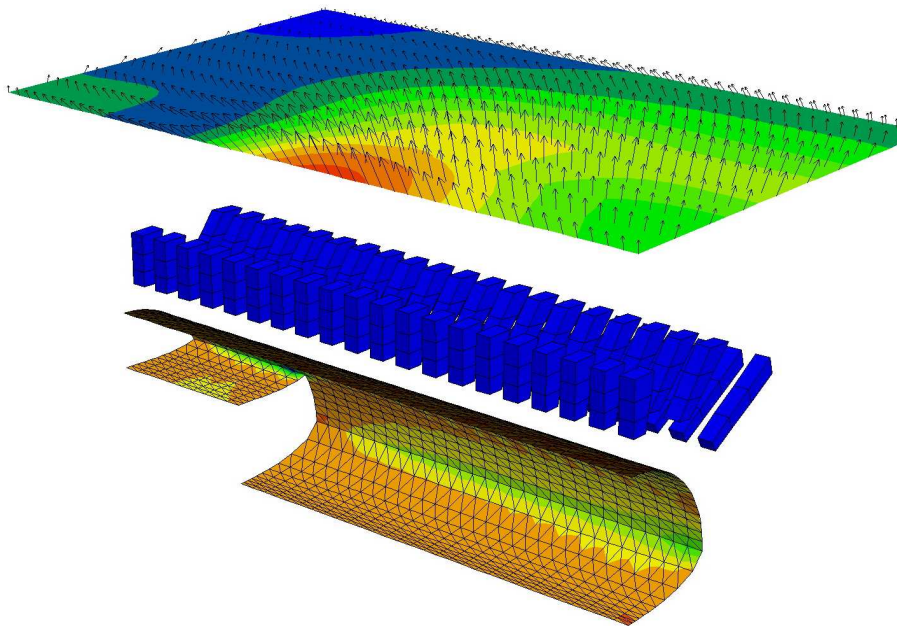


Abb. 7: Hebungen der Geländeoberfläche infolge der Injektionsmaßnahmen; Kontur- und Vektorplot

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Die numerischen Berechnungen zeigen, dass durch Injektionsmaßnahmen mit der vorgeschlagenen radialen Anordnung der Injektionszonen Setzungen der Geländeoberfläche ausgeglichen werden können. Zur Kompensation der vorausgehenden Setzungen müssen aber temporär Hebungen toleriert werden. Die Injektionsmaßnahmen führen auch durch höhere Konvergenzen im Tunnelquerschnitt zu einer höheren Auslastung der Spritzbetonschale, wobei die Belastung der Schale sehr von der Form der Injektionszonen beeinflusst wird.

Beim oberflächennahen Tunnelbau sollte ein möglichst steifer und früh tragender Ausbau mit hoher Festigkeit eingebaut werden, um die vortriebsinduzierten Setzungen gering zu halten. Dies kann mit einem möglichst geringen Auslastungsgrad durch die Verwendung z.B. einer dicken, stark bewehrten Spritzbetonschale erreicht werden. Der Mehrwert dieses Verfahrens ist die nahezu Entkoppelung der Oberflächensetzungen von der Schalensteifigkeit. Die

Schalensteifigkeit und damit die Schalen-/Spritzbetonstärke kann somit reduziert bzw. die Abschlüge auf die zufolge Gebirgsstabilität mögliche Länge vergrößert werden, wobei das maßgebende Bemessungskriterium der Auslastungsgrad ist.

Zusätzlich wird mit Hilfe der Injektionsmaßnahmen der Baugrund oberhalb des Tunnels deutlich verbessert, ein gewölbeförmiger, verdichteter Bodenkörper wird gebildet.

## LITERATUR

- Buchet G., Van Cotthem A. (1999): *3D 'Steady State' numerical modeling of tunneling and compensation grouting*. Proc. of 1st Int. Symp. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, Detournay C.; Hart, R. (eds.), 255-261, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Gimpel M. (2006): *Numerische Modellierung von Kompensationsinjektionen im Tunnelbau*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben.
- Hahn H.G. (1985): *Elastizitätstheorie*. B.G. Teubner, Stuttgart.
- Itasca Consulting Group (2005): *FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua*. Manual, 3rd Edition, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- Itasca Consulting Group (2006): *FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*. Manual, 3rd Edition, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- Kummerer C. (2003): *Numerical modelling of displacement grouting and application to case histories*. Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz, Riedmüller G. et al. (eds.).
- Österreichisches Normungsinstitut (2001): *ÖNORM EN 12715, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau), Injektionen*. Fachnormenausschuss Grundbau, Wien.
- Pacher F. (1964): *Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues*. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Suppl. I., 149-161.
- Peck R.B. (1969): *Deep excavations and tunnelling in soft ground*. State of the art report. Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 225-290, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Pittino G., Golser J. (2004): *Creep Behaviour of Alpine Salt Rock and the Influence of Insoluble Residues in Solution Mining*. Proc. 1st Europ. Reg. Conf. of IAEG, Liège, Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe – A European Perspective, Hack R. et al. (eds.) 593-603, Springer, Berlin.
- Pregl O. (1991): *Handbuch der Geotechnik*. Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur, Wien, 207 – 254.
- Schuller E., Pittino G. (2008): *Numerische Modellierung von Verdrängungsinjektionen zur Kompensation von Setzungen beim oberflächennahen Tunnelbau*. Proc. 23. CVK, Graz, Sondermaßnahmen bei der Erstellung innerstädtischer Infrastrukturbauten, Dietzel M. et al. (eds.), 97-110, Gruppe Geotechnik Graz, Technische Universität, Graz.
- Stelzer G. (2004): *Gebirgsbewegungen infolge eines Tunnelvortriebes*. Dissertation, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben.
- Warner J. (2004): *Practical handbook of grouting*. John Wiley & Sons, Hoboken.