



# Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz

# Nachweis nach Swisscode

# **Bachelorarbeit FS 2016**

Autor:Lukas BernerBetreuer:Christian Bommer, MSc Bauing, HSRE-Mail:Iberner@hsr.chExaminator:Christian Bommer, MSc Bauing, HSRMatrikelnummer:13-151-402Experte:Dr. Pierre A. Mayor, IGT ETHZAdresse:In der Weid 11Themengebiet:Geotechnik / Bodenmechanik8600 DübendorfStudiengang:Bauingenieurwesen

Erstellt am: 02. Mai 2016 Letzte Änderung am: 21. Juni 2016



Abstract



## Abstract

Problem	Da aufgrund des knapper werdenden Siedlungsraums ein verdichtetes Bauen nach in- nen gefordert wird, werden bestehende Gebäude heutzutage oftmals aufgestockt. Dadurch erfahren neben den bestehenden Tragstrukturen auch die Fundation und der Baugrund eine Mehrbelastung. Reicht der vorhandene Baugrundwiderstand nicht aus, oder werden die Setzungen zu gross, kann der Baugrund mit Injektionen von expandie- rendem Kunstharz verbessert werden.
Ziel	Bis anhin wurde die Wirkung dieser Baugrundverbesserung mittels Rammsondierungen, welche vor und nach den Injektionen durchgeführt wurden, überprüft. In dieser Arbeit wurde die Baugrundverbesserung durch expandierende Kunstharzinjektionen für ein konkretes, vereinfachtes Projekt quantifiziert. Im Anschluss wurden die erforderlichen Nachweise nach Swisscode erbracht.
Methode / Vorgehen	Nach einer detaillierten Analyse der Wirkungsweise der Injektionen von expandieren- dem Kunstharz in numerischen und analytischen Modellen, wurde für das betrachtete Projekt ein komplexeres numerisches Modell erstellt. Danach wurden verschiedene Vor- schläge zur Quantifizierung der verbesserten Bodeneigenschaften erarbeitet. Für das betrachtete Projekt wurde die Verbesserung anschliessend explizit quantifiziert, worauf die Nachweise nach Swisscode geführt werden konnten.
Wesentliche Ergebnisse	Für die detaillierte Untersuchung der Wirkungsweise der Injektionen wurde eine Sensiti- vitätsanalyse durchgeführt. Die verschiedenen numerischen und analytischen Berech- nungsansätze wiesen teilweise nicht unwesentliche Differenzen bei den Ergebnissen auf. Es hat sich gezeigt, dass sich die Reaktion des Bodens auf die Expansion der Injek- tionen relativ unempfindlich gegenüber den variierenden Materialparametern verhält, aber die Randbedingungen bei der Berechnung eine grosse Rolle spielen. Die Ergeb- nisse der Berechnungen sind dementsprechend mit ausreichenden Sicherheitsüberle- gungen zu beurteilen.
	Allgemein konnte festgestellt werden, dass durch die Injektionen von expandierendem Kunstharz unter bestehenden Gebäuden sowohl die Festigkeits- wie auch die Steifig- keitswerte des Bodens wesentlich erhöht werden. Am betrachteten Projekt konnte auf- grund der Kunstharzinjektionen eine Steigerung der Tragfähigkeit bis 98% erzielt wer- den, quasi eine Verdopplung des Widerstands. Die Setzungen infolge von zukünftigen Mehrbelastungen sind nach der Verbesserung des Baugrunds um rund 30% kleiner als im Ausgangszustand. Im Verhältnis zu den minimalen baulichen Massnahmen, die zur Ausführung der Injektionen benötigt werden und der Tatsache, dass keine grossen In- stallationen vorhanden sein müssen, ist die Baugrundverbesserung, welche erreicht werden kann, beachtlich.
Empfehlungen	Es wird empfohlen, dass die Methode zur Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz noch genauer, an komplexeren und praxisnäheren Projek- ten mit z.B. unterschiedlichen Bodenschichten, untersucht wird. Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten erste Ansätze und Vorgehensweisen, wie die Nachweise nach Swisscode für einen verbesserten Boden geführt werden können.





Inhalt

## Inhalt

Ał	ostract		2
1	Beze	ichnungen	4
2	Einle	eitung	6
3	Grun	dlagen	8
	3.1	Grundlagen zu Injektionen von expandierendem Kunstharz	8
	3.1.1	Wirkungsweise der Injektionen	8
	3.1.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften des Kunstharzes	9
	3.2	Grundlagen zum betrachteten Projekt	11
	3.2.1	Grundlagenprojekt	12
	3.2.2	Betrachtetes Projekt	13
4	Bere	chnungsmodelle	14
	4.1	Aufbau der Berechnungsmodelle	14
	4.1.1	Numerisches Modell des betrachteten Projekts	14
	4.1.2	Analytisches und numerisches Modell für die Sensitivitätsanalyse der Parameter	16
	4.2	Vorgehen bei den Berechnungen	18
	4.2.1	Vorgehen bei der analytischen Berechnung	19
	4.2.2	Vorgehen bei der numerischen Berechnung	21
5	Erge	bnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter	23
	5.1	Basismodell	23
	5.2	Sensitivitätsanalyse	24
	5.3	Folgerungen aus der Sensitivitätsanalyse	27
6	Erge	bnisse der numerischen Berechnung des betrachteten Projekts	28
	6.1	Reaktionskurven des Bodens	28
	6.2	Spannungen im Boden	30
7	Quar	ntifizierung der Baugrundverbesserung	32
	7.1	Scherfestigkeit für bindige Böden	32
	7.2	Scherfestigkeit für nichtbindige Böden	35
	7.3	Steifigkeit	37
	7.4	Quantifizierung der Baugrundverbesserung für das betrachtete Projekt	38
8	Nach	weise nach Swisscode für das betrachtete Projekt	41
	8.1	Bemessungswerte	41
	8.2	Tragsicherheit	42
,	8.3	Gebrauchstauglichkeit	45
9	Schl	ussfolgerungen	46
10	Liter	atur und Quellenverzeichnis	48
11	Erklä	irung zur Urheberschaft	49





Bezeichnungen

## 1 Bezeichnungen

E ΔH ME OCR P P <sub>C</sub> R <sub>C</sub> SF V <sub>ba</sub> V <sub>ba</sub> V <sub>be</sub> V <sub>ra</sub> V <sub>re</sub> /V <sub>ra</sub> ΔV	Elastizitätsmodul Differenz der Last, die durch den Druck der Injektion erzeugt wird Zusammendrückungsmodul Überkonsolidierungsgrad, NC normal konsolidiert, OC überkonsolidiert Expansionsdruck / Grenzflächendruck, -spannung Expansionsdruck / Grenzflächendruck, -spannung im Gleichgewicht Expansionsverhältnis / Ausdehnungsverhältnis der Kunstharzes im Gleichgewicht Sicherheitsfaktor initiales Wulstvolumen Wulstvolumen im Endzustand, nach der Expansion initiales Harzvolumen Harzvolumen in Endzustand, nach der Expansion Expansionsverhältnis / Ausdehnungsverhältnis der Kunstharzes Volumenänderung
а	Wulstradius im Endzustand, nach der Expansion
<b>a</b> <sub>0</sub>	initialer Wulstradius
a <sub>f</sub>	Radius der Injektionsbohrung
b	plastischer Radius
C'	effektive Kohäsion
е	Porenziffer
e <sub>0</sub>	initiale Porenziffer
k <sub>0</sub>	Ruhedruckkoeffizient
k <sub>w</sub>	Durchlässigkeit für Wasser
kr	Durchlässigkeit für Kunstharz
n	Porosität
q	Flächenlast
<b>q</b> <sub>d</sub>	Flächenlast auf Design-Niveau
S	gleichmässige Setzungen
t	Zeit
Z	Tiefe ab OK Terrain
Z <sub>max</sub>	maximale Uberlagerungshöhe
Vra	initiales Raumgewicht des Kunstharzes
Vre	Raumgewicht des Kunstharzes im Endzustand, nach der Expansion
Vsat	gesättigtes Raumgewicht des Bodens
Yunsat	ungesättigtes Raumgewicht des Bodens
έν	volumetrische Dehnung
v	Poissonzahl
σ <sub>c</sub>	eindimensionaler Verdichtungswiderstand
σ'n	effektive horizontale Spannung
σ'v	effektive vertikale Spannung
σ' <sub>ν, max</sub>	Vorbelastungsspannung



IBU INSTITUT FÜR BAU UND UMWELT

Bezeichnungen

Scherfestigkeit des Kunstharzes Te maximale Scherfestigkeit Tf kritische Scherfestigkeit Τk maximale Scherfestigkeit T<sub>max</sub> Restscherfestigkeit  $\mathbf{T}_{\mathsf{R}}$ φ' effektiver Reibungswinkel maximaler effektiver Reibungswinkel  $\phi'_{\text{max}}$ effektiver Restreibungswinkel Ψ'n Reibungswinkel der Gesamtscherfestigkeit φ's Dilatanzwinkel Ψ



Einleitung

## 2 Einleitung

Kontext	Je länger je mehr wird aufgrund des knapper werdenden Siedlungsraums und des Be- völkerungswachstums ein verdichtetes Bauen nach innen gefordert. Dies wurde zuletzt durch das Raumplanungsgesetz RPG von 01.05.2014 gesetzlich verankert. Danach werden neue Gebäude mit hohen Ausnutzungsziffern erstellt, und bestehende Bau- werke werden aufgestockt.
Problem	Die Aufstockung von Gebäuden erfordert nicht nur eine Überprüfung der bestehenden Tragstruktur, vielmehr ist auch deren Wirkung auf Fundation und Baugrund zu berück- sichtigen. Bei schlecht tragfähigen Böden sind infolge einer Mehrbelastung Setzungen und Stabilitätsprobleme nicht auszuschliessen. Ereignen sich sogar differentielle Set- zungen sind Schäden am Bauwerk möglich. Risse in Wänden und Decken oder Brüche von am Gebäude anschliessenden Werkleitungen können die unmittelbare Folge sein.
	Kann ein Baugrund die zusätzlichen Lasten nicht abtragen oder hat sich ein Gebäude bereits differentiell gesetzt, stehen schon seit längerer Zeit diverse Methoden zur Bau- grundverbesserung, Nachgründung und Hebung von bestehenden Bauten zur Verfü- gung. Dazu zählen klassische Unterfangungen oder Unterfangungen mit Baugrundver- besserungen wie Rüttelstopfsäulen, Injektionen oder Pfählen. Diese Arten der Tragfä- higkeitserhöhung sind meistens aufgrund von aufwändigen Installationen und schwieri- gen örtlichen Verhältnissen sehr komplex in ihrer Realisierung. Auch die teils hohen Baukosten dieser Massnahmen sind nicht unwesentlich.
	Eine Alternative zu den bekannten Methoden bietet die Injektion von expandierendem Kunstharz aus Polyurethan PUR in den Untergrund. Bei dieser neueren Baugrundver- besserungsmethode wird ein, im Anfangsstadium flüssiger, Kunstharz über Injektionslei- tungen mit einem Durchmesser von lediglich 26 mm in den Boden injiziert. Nach dem Austritt des Harzes am Injektionspunkt folgt eine Verfestigung und gleichzeitig, infolge der Entwicklung eines Innendrucks im Harz, eine Volumenexpansion. Durch die Expan- sion verdichtet sich der umliegende Boden und erhält bessere geotechnische Eigen- schaften. Auch werden die Tragfähigkeit gesteigert und unter Umständen Hebungen von gesetzten Gebäuden erzeugt. Die Methode glänzt durch kurze Bauzeiten, ver- gleichsweise tiefe Ausführungskosten und minimale bauliche Eingriffe am bestehenden Bauwerk.
Ziel	Bis anhin wurde die Wirkung der expandierenden PUR-Injektionen mittels Rammsondie- rungen, welche vor und nach dem Eingriff ausgeführt wurden, überprüft. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Baugrundverbesserung infolge der expandierenden Kunstharzinjektio- nen zu quantifizieren und die Nachweise nach Swisscode zu führen. Dazu wird ein kon- kretes Projekt betrachtet. Das Projekt basiert auf den Grundlagen eines Chalets in Grin- delwald, welches 2006 nach differentiellen Setzungen wieder angehoben wurde.

INSTITUT FÜR

BAU UND UMWELT

IBU



Einleitung

#### Vorgehen

Nach einem ausführlichen Studium der Grundlagen wird ein numerisches Modell zur Untersuchung der Wirkungsweise der expandierenden PUR-Injektionen im Boden erstellt. Zur Kontrolle der Plausibilität des numerischen Modells werden analytisch Handrechnungen, zu welchen die Literatur die nötigen Grundlagen liefert, ausgeführt. Anschliessend werden Vorschläge zur Quantifizierung der durch die Injektionen verbesserten Baugrundeigenschaften erarbeitet. Dadurch soll die Baugrundverbesserung für das betrachtete Projekt quantifiziert werden. Zum Schluss werden die Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt erbracht.





## 3 Grundlagen

## 3.1 Grundlagen zu Injektionen von expandierendem Kunstharz

In diesem Abschnitt sind die wichtigsten Grundlagen zu den Injektionen von expandierendem Kunstharz zusammengestellt. Dies sind die Wirkungsweise der Injektionen im Boden sowie die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Kunstharzes.

#### 3.1.1 Wirkungsweise der Injektionen

Die PUR-Injektionen verhalten sich je nach Korngrösse des Bodens anders. Man kann zwischen der Wirkungsweise in grobkörnigen Böden, welche hauptsächlich aus Sand und Kies bestehen, und feinkörnigen Böden aus feinem Sand, Silt oder Ton, unterscheiden.

grobkörnige Bei grobkörnigen Böden ist die Durchlässigkeit genügend Böden gross, sodass das Harz, zu Beginn noch im flüssigen Zustand, unmittelbar nach dem Injizieren in die Poren des Bodens eindringt. Dadurch entsteht ein Wulst (ein Konglomerat aus Bodenkörnern und Kunstharz), welcher sich in einer nächsten Phase infolge Expansion des Kunstharzes ausdehnt. Abbildung 1 zeigt einen solchen Wulst. Die Ausdehnung erfolgt bis zu einer Gleichgewichtsspannung, bei welcher der Expansionsdruck des Harzes gleich der Grenzflächenspannung des Bodes ist. Die Folge der Expansion ist eine Verdichtung des um den Wulst umliegenden Bodens, wodurch die Spannungen im Boden erhöht und die Festigkeit und Steifigkeit gesteigert werden. Der Wulst selber verfügt bereits durch das eingedrungene Harz über erhöhte Steifigkeits- und Festigkeitsparameter. Dominijanni & Manassero (2016).



Abbildung 1: Wulst (Quelle: Dominijanni & Manassero (2016))

feinkörnige Feinkörnige Böden besitzen in der Regel eine zu kleine Durchlässigkeit, dass sich ein Wulst ausbilden könnte. In-Böden folge der Ausdehnung des Harzes entstehen im Boden Risse. Diese bilden sich rechtwinklig zur kleinsten Hauptspannung aus, welche bei normal konsolidierten Böden ( $k_0 < 1$ ) horizontal liegt. Das Kunstharz breitet sich in den Rissen weiter aus und verdichtet den umliegenden Boden. So werden auch hier bessere Festigkeits- und Steifigkeitswerte erzielt. Schreitet die Verdichtung so lange voran, bis die horizontalen Spannungen grösser werden als die vertikalen Spannungen, spricht man von einer Rotation der Hauptspannungen. Weitere Risse bilden sich von nun an in horizontaler Richtung aus, wodurch neben der Verdichtung des umliegenden Bodens eine Hebung des Geländes erfolgen kann. Abbildung 2 zeigt die Risse im Boden nach einem Injektionsversuch. Da in feinkörnigen Böden undrainierte



Abbildung 2: Vertikale und horizontale Risse durch Injektion (Quelle: Dominijanni & Manassero (2016))





Verhältnisse herrschen, ist die Konsolidierung, das heisst der Abbau der Porenwasserüberdrücke, zu beachten. Dies kann zur Folge haben, dass die Injektionen zeitlich versetzt angeordnet werden müssen, um ungewollte Setzungen zu vermeiden. Dominijanni & Manassero (2016).

## 3.1.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften des Kunstharzes

Das verwendete Injektionsmittel besteht aus einem Kunstharz aus Polyurethan (PUR). Der wesentlichste Unterschied zu gewöhnlichen Injektionsmitteln, wie beispielsweis Zementsuspension, ist die Expansionsfähigkeit des Polyurethans. Das Kunstharz wird im flüssigen Zustand in den Boden eingespritzt. Dort expandiert es infolge einer exothermen Reaktion und erhärtet. Die Reaktion läuft innerhalb von einigen Sekunden bis wenigen Minuten ab. Sie wird unter anderem von der Temperatur und dem verwendeten Harz und Katalysator beeinflusst. Diverse Eigenschaften des Harzes, wie spezifisches Gewicht, Expansionsdruck, Scherfestigkeit oder E-Modul hängen von der Expansionsfähigkeit des Harzes ab, welche wiederum je nach Boden und örtlichen Verhältnissen variiert. Dominijanni & Manassero (2016).

**Expansions**druck Der Expansionsdruck, welcher im PUR-Harz aufgebaut werden kann ist abhängig vom Verhältnis zwischen Endvolumen V<sub>re</sub> und ursprünglichem Volumen V<sub>ra</sub>. Das Ausdehnungsverhältnis V<sub>re</sub>/V<sub>ra</sub> des Kunstharzes im Boden ist an den Grenzflächendruck im Boden gebunden. Die Beziehung in Formel 1 wurde empirisch gefunden.

$$\frac{V_{re}}{V_{ra}} = \frac{\gamma_{ra}}{\gamma_{re}} = \frac{10.5}{0.36 + \frac{1}{0.23} \cdot \ln[1 + P(MPa)]}$$

Formel 1: Expansionsverhältnis



Abbildung 3: Verhältnis vom Ausdehnungsverhältnis zum Expansionsdruck, rheologische Kurve

In Abbildung 3 ist die Formel 1 grafisch dargestellt. Es ist zur erkennen, dass mit einem zunehmenden Ausdehnungsverhältnis der Expansionsdruck im Harz abnimmt. Weiter sieht man, dass eine fast 30-fache Ausdehnung möglich ist. Dominijanni & Manassero (2016).





#### spezifisches Gewicht

Das spezifische Gewicht des Harzes im flüssigen Anfangszustand  $\gamma_{ra}$  beträgt 10.5 kN/m<sup>3</sup>. Kann sich das Harz frei ausdehnen, das heisst der Expansionsdruck wäre gleich null, beträgt das spezifische Gewicht des expandierten Harzes  $\gamma_{re}$  0.36 kN/m<sup>3</sup>. Das spezifische Gewicht hängt also vom Expansionsdruck ab. Die Beziehung in Formel 2 wurde empirisch gefunden.

$$P = e^{0.23 (\gamma_{re} - 0.36)} - 1$$

Formel 2: Expansionsdruck



Abbildung 4: Spezifisches Gewicht des expandierten Harzes in Abhängigkeit zum Expansionsdruck (Quelle: Dominijanni & Manassero (2016))

Abbildung 4 stellt die empirische Beziehung aus Formel 2 dar. Je grösser der Expansionsdruck und je kleiner das Ausdehnungsverhältnis ist, desto grösser ist das spezifische Gewicht des expandierten Harzes. Dominijanni & Manassero (2016).

**E-Modul** Der Elastizitätsmodul ist an das spezifische Gewicht des expandierten Harzes und dadurch an das Ausdehnungsverhältnis der Injektion gebunden. Er wurde experimentell bestimmt und variiert zwischen 10'000 und 80'000 kN/m<sup>2</sup>. Siehe Abbildung 5. Damit ähnelt er dem E-Modul eines typischen Bodens unter einem Fundament. Dominijanni & Manassero (2016).



Abbildung 5: E-Modul in Abhängigkeit zum spezifischen Gewicht des expandierten Harzes (Quelle: Dominijanni & Manassero (2016))





Scherfestigkeit Die Scherfestigkeit des expandierten Harzes (Formel 3) besteht hauptsächlich aus Kohäsion. Diese kann über den experimentell bestimmten, eindimensionalen Verdichtungswiderstand  $\sigma_c$  hergeleitet werden. Dominijanni & Manassero (2016).

$$\tau_e = \frac{\sigma_c}{2}$$

Formel 3: Scherfestigkeit



Abbildung 6: Eindimensionaler Verdichtungswiderstand in Abhängigkeit zum spezifischen Gewicht des expandierten Harzes (Quelle: Dominijanni & Manassero (2016))

In Abbildung 6 ist der eindimensionale Verdichtungswiderstand in Abhängigkeit zum spezifischen Gewicht zu sehen. Die Scherfestigkeit nach Formel 3 variiert zwischen 125 und 3250 kN/m<sup>2</sup>.

**Durchlässigkeit** Neben der Verbesserung der Festigkeits- und Steifigkeitswerte des Bodens vermindert sich durch die Injektionen auch die Wasserdurchlässigkeit. Messungen ergaben kw-Werte von 10<sup>-9</sup> bis 10<sup>-8</sup> m/s am reinen Harz und 10<sup>-10</sup> m/s am behandelten Boden. Der behandelte Boden ist somit praktisch wasserundurchlässig. Dominijanni & Manassero (2016).

## 3.2 Grundlagen zum betrachteten Projekt

Nachfolgend wird das betrachtete Projekt, für welches der Tragfähigkeitsnachweis geführt wird, beschrieben. Zuerst werden die vorhandenen Grundlagen zum Projekt des Chalets in Grindelwald zusammengefasst, worauf die Beschreibung des betrachteten Projekts für diese Arbeit folgt. Das Projekt in Grindelwald soll nur als Grundlage für das betrachtete Projekt dienen. Es wurden diverse, zweckmässige Anpassungen und Vereinfachungen vorgenommen.





## 3.2.1 Grundlagenprojekt

#### Allgemein

Das betrachtete Projekt basiert auf den Grundlagen eines Chalets in Grindelwald, welches aufgrund von grossen differentiellen Setzungen mit Injektionen von expandierendem Kunstharz der Firma Uretek wieder angehoben wurde. Das Chalet befindet sich im Gebiet einer aktiven Rutschung mit Bewegungen von 50 bis 100 mm pro Jahr. 2003 wurde eine Untersuchung der Hangstabilität, aufgrund von Verformungen am Gebäude, durchgeführt. Man stellte fest, dass sich das Chalet infolge der unregelmässigen Bewegungen des Hangs setzte. 2006 folgte die Hebung durch die Injektionen. In Abbildung 7 ist das Chalet links im Bild zu sehen.



Abbildung 7: Chalet in Grindelwald, links im Bild (Quelle: Uretek (Internet: http://www.uretek.ch/de/referenzprojekte/gebaeude-hebung/haus-hebung-in-grindelwald/ [Stand 17.05.16]))

- Gebäude Das Erdgeschoss des dreistöckigen Chalets besteht grösstenteils aus Stahlbeton. Fundamentplatte, Decke über Erdgeschoss, sowie Nord- und Ostwände sind betoniert. Die Süd- und Westwände bestehen aus Mauerwerk. Um die Fundamentplatte läuft zusätzlich ein Frostrigel aus Beton. Die oberen Geschosse bestehen aus einer Chalet-Holzkonstruktion. Die Fundationsfläche des Gebäudes hat eine Länge von 12 Meter und eine Breite von 8.50 Meter.
- **Umfeld** Wie weiter oben bereits beschrieben, steht das Gebäude im Bereich einer aktiven Rutschung. In der Gefahrenkarte befindet sich das Grundstück deshalb im blauen Gebotsbereich, wobei es westlich an die rote Zone erheblicher Gefährdung grenzt.

Die Rutschmasse des Hanges erstreckt sich über ein grosses Gebiet von einer Kote von 1350 m.ü.M. bis zu einer Koten von 1100 m.ü.M.. Die Gleitfläche der Rutschung wird in ca. 8 bis 10 m Tiefe vermutet.

**Baugrund** Der Baugrund besteht aus einer ca. 1 Meter starken Deckschicht. Darunter folgt ein Horizont aus weichem, tonig siltigem bis sandigem Gehängeschutt. Weiter folgt ein verrutschter Gehängeschutt, durchmischt mit aufgearbeitetem, verwittertem Fels. In 9 bis 10 m Tiefe steht der Fels an.



Wasserver-<br/>hältnisseDer Wasserspiegel im Untergrund variiert je nach Niederschlag. Er steht zwischen ca.1.5 bis 3.5 m unter OK Terrain an.

## 3.2.2 Betrachtetes Projekt

- Allgemeines Die Geländeoberfläche wurde vereinfachend als eben modelliert und die Einbindung der Fundation in den Boden wurde vernachlässigt. Die Fundation wurde durch eine gleichmässig verteilte Flächenlast belastet, welche die Gebäudelasten repräsentiert. Als Lasten wurden die ständigen Einwirkungen sowie die Nutzlasten berücksichtigt. Im Untergrund wurden in einem gleichmässigen Raster angeordnete, kugelförmige Injektionen auf drei Ebenen vorgesehen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Injektionen als Verdichtungsinjektionen wirken. Das heisst die Wirkungsweise ist mit dem Verhalten der Kunstharzinjektionen in grobkörnigen Böden zu vergleichen.
- UmfeldDie Untersuchung der Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem<br/>Kunstharz konzentriert sich in dieser Arbeit darauf, wie der Baugrund unter bestehenden<br/>Gebäuden verbessert werden kann. Deshalb wurde vernachlässigt, dass sich das Ge-<br/>bäude differentiell gesetzt hat und sich im Gebiet einer aktiven Rutschung befindet.
- **Baugrund** Für die 10 Meter starke Bodenschicht wurden, unter Berücksichtigung der vorhandenen Grundlagen, die charakteristischen Parameter in Tabelle 1 abgeschätzt.

Parameter		
ungesättigtes Raumgewicht	γunsat	18.0 kN/m <sup>3</sup>
gesättigtes Raumgewicht	γsat	19.0 kN/m <sup>3</sup>
effektiver Reibungswinkel	φ'	25.0 °
effektive Kohäsion	C'	0 kN/m <sup>2</sup>
Dilatanz	Ψ'	0 °
Zusammendrückungsmodul	ME	5'000 kN/m <sup>2</sup>
Porenziffer	е	0.60
Durchlässigkeit	kw	10⁻ <sup>7</sup> m/s

Tabelle 1: Bodenparameter

Es wurde angenommen, dass die 10 Meter starke Bodenschicht die einzige Schicht ist. Der Baugrund ist somit homogen bis der anstehende Fels den Abschluss bildet.

Wasserverhältnisse

Ein allfälliger Einfluss von Grundwasser wurde vernachlässigt. Das bedeutet, dass in den Berechnungen kein Grundwasserspiegel vorhanden ist.





## 4 Berechnungsmodelle

## 4.1 Aufbau der Berechnungsmodelle

Der folgende Abschnitt erklärt den Aufbau der verschiedenen Berechnungsmodelle. Zur Untersuchung der Wirkungsweise der Injektionen wurde eine Sensitivitätsanalyse mit numerischen und analytischen Modellen durchgeführt, in welcher verschiedene Parameter variiert wurden. Weiter wurde für das betrachtete Projekt ein numerisches Modell erstellt.

## 4.1.1 Numerisches Modell des betrachteten Projekts

Für die numerische Berechnung wurde in Plaxis 2D ein zweidimensionales plane strain Finite-Elemente Modell erstellt.

Aufbau



Abbildung 8: Modellaufbau

In Abbildung 8 ist der Aufbau des FEM-Modells ersichtlich. Es wurde ein Längsschnitt der 8.50 m breiten und 12.0 m langen Fundation betrachtet. Der Untergrund besteht aus einer homogenen Bodenschicht von 10 m Stärke. Die Fundation wurde durch eine flache Betonplatte simuliert, welche durch eine gleichmässig verteilte Flächenlast belastet ist. Die Flächenlast beinhaltet die ständigen Einwirkungen sowie die Nutzlasten des Gebäudes. Unterhalb der Bodenplatte wurden kugelförmige Injektionen auf drei Ebenen angesetzt. Die erste Ebene folgte bereits auf -0.50 m ab OK Terrain. Die Injektionen wurden in einem Raster mit 1 m Abstand zueinander angeordnet. Da das Modell symmetrisch ist, wurde in Plaxis 2D nur eine Hälfte modelliert.





-

Flächenlast

Die Flächenlast, welche über die ganze Fundationsplatte gleichmässig verteilt ist, besteht aus ständigen Einwirkungen (Eigengewicht und Auflasten) und aus den Nutzlasten.

Für die Analyse der Expansion der Injektonen und der daraus folgenden Spannungsänderungen, wurden die Einwirkungen auf dem charakteristischen Niveau betrachtet. Das Ausdehnungsvermögen der Injektionen wird durch die vorherrschenden Spannungen im Boden merklich beeinflusst, weshalb eine Erhöhung der Last mit entsprechenden Partialfaktoren nach Norm nicht sinnvoll wäre. Die charakteristische Last beträgt 35.9 kN/m<sup>2</sup>.

Für den Tragfähigkeitsnachweis müssen die charakteristischen Einwirkungen gemäss Swisscode mit den entsprechenden Faktoren erhöht werden. Die Flächenlast für den Tragfähigkeitsnachweis im Grenzzustand Typ 2 (GZ 2) beträgt 49.1 kN/m<sup>2</sup>, jene bei der Betrachtung von Problemen des Grenzzustandes Typ 3 (GZ 3) 37.8 kN/m<sup>2</sup>. Tabelle 2 fasst die verschiedenen Beträge der Flächenlast zusammen.

#### Tabelle 2: Flächenlasten q

Zustand	q
Charakteristisch	35.9 kN/m <sup>2</sup>
Tragfähigkeit GZ 2	49.1 kN/m <sup>2</sup>
Tragfähigkeit GZ 3	37.8 kN/m <sup>2</sup>

Materialparameter In Tabelle 3 sind die Parameter, welche im Modell verwendet wurden, ersichtlich.

#### Tabelle 3: Materialparameter

Parameter		Boden	Injektion	Interface	Fundation
Materialmodell	[-]	Mohr- Coulomb	Linear- elastisch	Linear- elastisch	Linear- elastisch
Drainagetyp	[-]	Drainiert	Nicht porös	Drainiert	Nicht porös
Raumgewicht ungesättigt	[kN/m <sup>3</sup> ]	18.0	19	0	0
Raumgewicht gesättigt	[kN/m <sup>3</sup> ]	19.0	-	0	-
Porenziffer	[-]	0.60	-	0.60	-
Elastizitätsmodul	[kN/m²]	3'000	80'000	3'000	30'000
Poissonzahl	[-]	0.35	0	0.35	0.20
effektive Kohäsion	[kN/m <sup>2</sup> ]	0	-	-	-
effektiver Reibungswinkel	[°]	25.0	-	-	-
Dilatanz	[°]	0	-	-	-
Durchlässigkeit	[m/s]	10 <sup>-7</sup>	-	10 <sup>-7</sup>	-
Konsolidation	[-]	NC	-	NC	-



BAU UND UMWELT

Berechnungsmodelle

Bei den Berechnungen hat sich gezeigt, dass durch eine dünne, linear-elastische Grenzschicht (Interface) zwischen Injektion und Boden der Grenzflächendruck sauber ermittelt werden kann. Ohne Grenzschicht ergaben sich unregelmässige Verteilungen mit stark variierenden Extremwerten infolge des Mohr-Coulomb Bruchkriteriums.

Die Bodenkennwerte wurden zur Ermittlung der Spannungsänderungen auf charakteristischem Niveau betrachtet. Dies, um möglichst die vorherrschenden Verhältnisse im Boden nachzubilden.

Initialer Radius der Injektionswulste wurden 0.20 m gewählt. Dies entspricht in etwa dem für das Grundlagenprojekt verwendeten Kunstharzgewicht.

Berechnungsphasen In der Praxis wird meistens mit dem Injizieren der obersten Injektionen direkt unterhalb der Bodenplatte begonnen. Anschliessend folgt die nächst tiefere Ebene. Zuletzt werden die tiefsten Injektionen durchgeführt. Weil durch jede Injektion die Spannungsverhältnisse im Boden verändert werden und sich somit die folgenden Injektionen anders ausdehnen, ist dieser Bauablauf auch für das Modell zu übernehmen. Das heisst, die Reakionskurven der untenliegenden Injektionsebenen werden nach der abgeschlossenen Expansion der darüberliegenden Injektionen ermittelt.

#### 4.1.2 Analytisches und numerisches Modell für die Sensitivitätsanalyse der Parameter

Das Modell, welches für die analytischen Berechnungen und die Sensitivitätsanalyse der Parameter benutzt wurde, musste wesentlich einfacher aufgebaut sein. Da bei der analytischen Berechnung der vorherrschende Druck um den Injektionswulst bekannt sein muss und dieser die Expansion merklich beeinflusst, war lediglich die Betrachtung eines einzigen Injektionswulstes auf einmal möglich. Das Zusammenwirken von mehreren Injektionen ist für eine analytische Berechnung zu kompliziert.

Aufbau Da nur ein Injektionspunkt analysiert wurde, bestand neben einem Aufbau als plane strain Modell auch die Möglichkeit, das Modell achsensymmetrisch aufzubauen. Dazu wird nur der halbe Aufbau modelliert. Dieser wird anschliessend bei den Berechnungen um die Symmetrieachse rotiert. Die Wirkungsweise der Injektion lässt sich dadurch besser darstellen (Injektionspunkt ist tatsächlich kugelförmig). Für komplexere Modelle mit mehreren Injektionspunkten ist diese Modellierungsart jedoch nicht mehr möglich. In Abbildung 9 sind die beiden Varianten des Aufbaus schematisch abgebildet. Bei der Sensitivitätsanalyse wurden beide Möglichkeiten des Aufbaus untersucht.



Abbildung 9: links plane strain, rechts achsensymmetrisches Modell (Quelle: Plaxis 2D 2016, Reference Manual (2016))



#### Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz



Berechnungsmodelle



Abbildung 10: Modellaufbau, links plane strain, rechts achsensymmetrisch

Das Modell (Modellaufbau in Abbildung 10 dargestellt) stellt wiederum einen Längsschnitt durch die Fundation dar. Für die Sensitivitätsanalyse wurde ein Basismodell definiert. Ausgehend davon wurden einzelne Parameter variiert und mit dem Basismodell verglichen. Die Materialparameter des Basismodells entsprechen jenen der Tabelle 3.

Flächenlasten Die Bodenplatte wurde wiederum durch die charakteristische Flächenlast von 35.9 kN/m<sup>2</sup> belastet. Bei der analytischen Berechnung ist zu beachten, dass nicht der gesamte Betrag der Flächenlast zum geostatischen Druck addiert wird, sondern, dass die Spannungsausbreitung im Boden berücksichtigt werden muss. Dies geschah jeweils mithilfe der 2:1-Methode.

#### Bei der Sensitivitätsanalyse variierten die Parameter in Tabelle 4. Variierende

## Parameter

Parameter	Basismodell		
Tiefe der Injektion	-1.50 m	-0.50 m	-2.50 m
Elastizitätsmodul der Injektion	80'000 kN/m <sup>2</sup>	10'000 kN/m <sup>2</sup>	40'000 kN/m <sup>2</sup>
Poissonzahl des Bodens	0.35	0.25	0.45
Porenziffer des Bodens	0.60	0.50	0.70
initialer Wulstradius	0.20 m	0.10 m	0.30 m

#### **Tabelle 4: Variation der Parameter**





## 4.2 Vorgehen bei den Berechnungen

Nachfolgend wird das Vorgehen bei den verschiedenen Berechnungen (analytisch und numerisch) für Injektionen mit expandierendem Kunstharz erläutert.

Allgemeines zum Vorgehen Die Injektionen von expandierendem Kunstharz in grobkörnigen Böden sollen primär eine verdichtende Wirkung auf den umliegenden Boden haben, wodurch dieser seine Steifigkeits- und Festigkeitswerte steigert. Zur Quantifizierung der expandierenden Injektionen müssen verschiedene Modellannahmen getroffen werden. Es wird angenommen, dass sich mit der Injektion ein Wulst im Boden bildet. Dieser dehnt sich solange aus, bis der Expansionsdruck gleich der mittleren Grenzflächenspannung des Bodens ist. Ist das Gleichgewicht erreicht, stoppt die Volumenzunahme des Wulstes und der umliegende Boden wird nicht mehr weiter verdichtet. Über den im Gleichgewicht herrschenden Druck P<sub>C</sub> erhält man das Ausdehnungsverhältnis R<sub>C</sub> der Injektion im Endzustand. Dadurch ist definiert, wie viel sich der Wulst ausgedehnt hat.

> Zur Berechnung setzt man den Injektionswulst im Boden verschiedenen Volumenausdehnungen aus und misst die dazugehörende Grenzflächenspannung an der Grenze von Boden zu Wulst. Zeichnet man alle Punkte in einem Diagramm auf, erhält man die Reaktionskurve des Bodens infolge der Expansion des Wulstes. Je stärker sich dieser ausdehnt, desto grösser wird die Spannung in der Grenzfläche. Ins gleiche Diagramm kann nun die rheologische Kurve des Kunstharzes eingetragen werden. Im Schnittpunkt der beiden Kurven befindet sich das gesuchte Gleichgewicht zwischen Expansionsdruck des Harzes und Grenzflächenspannung des Bodens. Ein schematisches Diagramm wird in Abbildung 11 gezeigt. Der herrschende Druck und das Ausdehnungsverhältnis der Injektion nach der Expansion sind somit bestimmt, und die Spannungsänderungen im Boden können ermittelt werden. Dominijanni & Manassero (2016).



Abbildung 11: Qualitatives Diagramm mit rheologischer Kurve des Kunstharzes und Reaktionskurve des Bodens





Der analytischen Berechnung von expandierenden Kunstharzinjektionen wird eine einfache Modellvorstellung zu Grunde gelegt. Nach einer initialen Eindringung des flüssigen Harzes in den Boden, welche von verschiedenen Parametern abhängt, folgt die Expansion des Wulstes in einem elasto-plastischen Medium unter drainierten Verhältnissen. Dazu stehen zwei verschiedene Expansionstheorien zur Verfügung. Dominijanni & Manassero (2016).

INSTITUT FÜR

BAU UND UMWELT

Initialer Eindrin-Da das Injektionsmittel bei der Injektion noch im flüssigen Zustand in den Boden eingungseffekt dringt, bildet sich je nach Durchlässigkeit und Porosität des Bodens und Injektionsdruck des Harzes ein Injektionswulst mit dem initialen Radius a<sub>0</sub> aus. Anschliessend folgt bei der Expansion des sich so gebildeten Wulstvolumen die gewünschte Verdichtung im Untergrund. Unter Berücksichtigung der Beziehung von Darcy und dem Massenerhaltungsgesetz wurde für den initialen Radius einer kugelförmigen Ausbreitung Formel 4 ermittelt.

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot a_f \cdot k_r \cdot \Delta H \cdot t}{n}} + a_f^3$$

Formel 4: initialer Radius

ar stellt darin den Durchmesser der Bohrung, kr die Durchlässigkeit für Kunstharz, n die Porosität des Bodens, t die Reaktionszeit des Kunstharzes und ΔH die Differenz der Last, die durch den Druck der Injektion erzeugt wird, dar. Dominijanni & Manassero (2016).

**Bestimmung des** Über die Expansionstheorie in elasto-plastischen Medien kann der Grenzflächendruck bei bestimmten Ausdehnungsverhältnissen des Wulstes bestimmt werden. Um das Materialverhalten des Bodens zu beschreiben, wird ein Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb verwendet. Neben effektivem Reibungswinkel, effektiver Kohäsion und Dilatanz sind zusätzlich der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl zur Definition erforderlich. Es sind zwei Lösungen, nach Carter et al. (1986) unter Annahme von kleinen Verformungen und nach Yu & Houlsby (1991) unter Annahme von grossen Verformungen in der plastischen Zone bekannt. Die Lösungen liefern mit grösser werdendem Expansionsverhältnis abweichende Reaktionskurven. Abbildung 12 zeigt einen Injektionswulst, um welchen sich durch die Expansion im elasto-plastischen Medium ein plastifizierter Bereich gebildet hat.



**Gleichgewicht**drucks





Zu jedem Ausdehnungsverhältnis gehört ein bestimmter Grenzflächendruck. Zeichnet man diese Beziehung in einem Diagramm auf, erhält man die Reaktionskurve des Bodens. Ist im gleichen Diagramm die rheologische Kurve des Kunstharzes aufgetragen, kann der Gleichgewichtszustand im Schnittpunkt der Kurven bestimmt werden. Die Berechnung erfolgt mit den Formeln 5 bis 9. Dominijanni & Manassero (2016).

$$V_{ba} = \pi \cdot \frac{4}{3} \cdot a_0^3$$

Formel 5: Anfangsvolumen Wulst

$$V_{be} = \pi \cdot \frac{4}{3} \cdot a^3$$

Formel 6: Endvolumen Wulst

(Endwulstradius a aus der Berechnung nach der Expansionstheorie)

 $\Delta V = V_{be} - V_{ba}$ Formel 7: Volumenänderung

$$V_{ra} = \pi \cdot \frac{4}{3} \cdot a_0^3 \cdot n$$

Formel 8: initiales Harzvolumen

$$V_{re} = V_{ra} + \Delta V$$

Formel 9: Endvolumen Kunstharz

Änderung der<br/>Spannungen im<br/>BodenIst der Gleichgewichtsdruck ermittelt, lassen sich die radialen und tangentialen Span-<br/>nungsänderungen infolge der Expansion des Kunstharzes berechnen. Auch der plasti-<br/>sche Radius b, im welchem der Boden plastifiziert, lässt sich bestimmen. Dominijanni &<br/>Manassero (2016).

Bodendefor-<br/>mationenFür die analytische Berechnung der Bodendeformation stehen auch Berechnungsan-<br/>sätze zur Verfügung. Jedoch ist zu beachten, dass diese nur noch für die Lösung von<br/>Carter et al. (1986) unter Annahme von kleinen Deformationen gelten. Dominijanni &<br/>Manassero (2016).





## 4.2.2 Vorgehen bei der numerischen Berechnung

Die numerischen Berechnungen werden mit Hilfe eines Finite-Elemente Programms, z.B. Plaxis 2D, durchgeführt.

Initialer Eindringungseffekt Der initiale Eindringungseffekt, das heisst die Bildung des Wulstes, wird nicht numerisch modelliert. Der initiale Radius muss demnach bereits bekannt sein. Er kann entweder mit Formel 4 gemäss der analytischen Rechnung ermittelt oder angenommen werden.

Bestimmung des Gleichgewichtdrucks Sind alle Strukturen im Modell erstellt, können die Bodenkörper welche die Injektion simulieren, schrittweise infolge einer vordefinierten Volumendehnung expandiert werden. Gleichzeitig kann das Programm die dazugehörenden Grenzflächenspannungen im Grenzbereich von Injektion zu Boden berechnen. In Abbildung 13 sind die Grenzflächendrücke infolge von verschiedenen Expansionen des Wulstvolumens zu sehen. Die so ermittelten Wertepaare ergeben die Reaktionskurve des Bodens. Der gesuchte Gleichgewichtsdruck stellt sich im Schnittpunkt der Reaktionskurve und der rheologischen Kurve des Kunstharzes ein. Bei der Berechnung werden die Formeln 10 bis 13 verwendet. Dominijanni & Manassero (2016).

$$V_{ba} = \pi \cdot \frac{4}{3} \cdot a_0^3$$

Formel 10: Anfangsvolumen Wulst

 $\Delta V = \varepsilon_V \cdot V_{ba}$ Formel 11: Volumenänderung

$$V_{ra} = \pi \cdot \frac{4}{3} \cdot a_0^3 \cdot n$$

Formel 12: initiales Harzvolumen

$$V_{re} = V_{ra} + \Delta V$$

Formel 13: Eindvolumen Kunstharz



Abbildung 13: mit der Expansion ansteigender Grenzflächendruck im Boden





Änderung der<br/>Spannungen im<br/>BodenDie numerische Berechnung wird erneut ausgeführt. Dieses Mal werden die Injektions-<br/>wulste jedoch nur solange expandiert, bis sie das Ausdehnungsverhältnis des im vorher<br/>ermittelten Gleichgewichtszustand erreicht haben. Nach der Berechnung können die<br/>Spannungsverhältnisse nach der Expansion der Injektion eingesehen werden.Bodendefor-<br/>mationenAuch die Bodendeformationen infolge der Ausdehnung der Injektionen liefert das Pro-<br/>gramm nach der erneuten Berechnung. Allerdings gibt es dabei Einschränkungen. Es ist

möglich, dass im FEM-Programm der Grenzdruck des Bodenmaterials erreicht wird. Über dem Grenzdruck setzt die Injektion ihre Expansion fort, ohne dass der Grenzflächendruck weiter zunimmt. So ist es nicht möglich, den Endzustand der Deformation zu bestimmen, da der maximale Grenzflächendruck vor dem Erreichen des Gleichgewichts zwischen Expansionsdruck des Harzes und Grenzflächendruck des Bodens erreicht wird. Anders formuliert: Das FEM-Programm ist nicht in der Lage die Volumenexpansion, welche zu einem Druckzustand führen würde, der den Grenzdruck übersteigt, zu modellieren. In solchen Fällen bildet die Änderung des Spannungszustandes das einzige brauchbare Ergebnis der numerischen Berechnung. Dominijanni & Manassero (2016).





Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter

#### 5 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zusammengefasst. Es wurden jeweils die Reaktionskurven aus Plaxis und der analytischen Berechnung miteinander verglichen.

#### 5.1 Basismodell

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die beiden analytischen Lösungen grosse Differenzen untereinander aufweisen. Die Kurve unter Annahme von grossen Deformationen steigt im Vergleich viel schneller an. Dieses Ergebnis war so zu erwarten, da grosse Deformationen auch eine grosse Ausdehnung der Injektion bedeuten. Dadurch steigt das Expansionsverhältnis schneller an. Die numerisch, mit dem plane strain Modell generierte Reaktionskurve des Bodens schneidet die rheologische Kurve des Kunstharzes etwa im gleichen Punkt, wie die Kurve der grossen Deformationen ( $R_c \approx 8.5 / P_c \approx 220$ kN/m<sup>2</sup>). Jedoch ist feststellbar, dass am Anfang, bei kleineren Grenzflächendrücken, bereits höhere Ausdehnungsverhältnisse herrschen. Die Kurve des achsensymmetrischen Modells aus Plaxis ist eher der Kurve der kleinen Deformationen ähnlich und verläuft wesentlich flacher als jene aus dem Plaxis plane strain Modell. Der Schnittpunkt mit der rheologischen Kurve ist demnach zu einem grösseren Grenzflächendruck bei kleinerem Expansionsverhältnis verschoben ( $R_c \approx 6.5 / P_c \approx 340 \text{ kN/m}^2$ ).



Abbildung 14: Reaktionskurven Basismodell





## 5.2 Sensitivitätsanalyse

Bei den folgenden Diagrammen sind wiederum die Reaktionskurven des Bodens und die rheologische Kurve des Kunstharzes abgebildet.

- Plaxis plain strain
- Plaxis achsensymmetrisch
- grosse Deformationen
- kleine Deformationen
- **Elastizitätsmodul** Der Elastizitätsmodul des Kunstharzes hat keinen Einfluss auf die Reaktionskurven des Bodens. Dies ist an den unveränderten Kurven in den Abbildungen 15 und 16 ersichtlich. Es sind keinerlei Unterschiede zu erkennen. Bei der analytischen Berechnung war dies von vornherein klar, da der E-Modul der Injektion kein Eingabeparameter ist. Umso mehr wird das Verhalten der numerischen Modelle, welche sich auch nicht verändert haben, plausibilisiert.



Abbildung 15: Reaktionskurven E = 10'000 kN/m<sup>2</sup>

Abbildung 16: Reaktionskurven E = 40'000 kN/m<sup>2</sup>





Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter

Initialer Radius Die analytisch ermittelten Reaktionskurven verändern sich bei der Variation des initialen Radius a<sub>0</sub> nicht. Dies, weil die Volumendehnung, egal wie gross das initiale Volumen ist, unverändert bleibt. Beim numerischen plane strain Modell sind jedoch Unterschiede zu erkennen. Je grösser der initiale Radius gewählt wird, desto steiler steigt die Reaktionskurve aus Plaxis an. Die Unterschiede sind vermutlich auf die unterschiedlichen Spannungsverhältnisse (oberhalb, unterhalb und seitlich des Wulstes) im Boden zurückzuführen. Diese sind bei einem grossen Injektionswulst viel unterschiedlicher als bei kleinen. Das achsensymmetrische Plaxis Modell hingegen ist, wie die analytischen Modelle, sehr unempfindlich gegenüber der Variation des initialen Radius.



Abbildung 17: Reaktionskurven a<sub>0</sub> = 0.10 m

Abbildung 18: Reaktionskurven a<sub>0</sub> = 0.30 m

Porenziffer Bei der Variation der Porenziffer sind kleine Unterschiede zu erkennen. Für alle Kurven gilt: Je grösser die Porenziffer, desto kleiner die Ausdehnungsverhältnisse bei einem bestimmten Grenzflächendruck. Dies kommt daher, dass bei gleichem Wulstvolumen das Harzvolumen bei geringer Porosität kleiner ist als bei grosser Porosität. Bei gleicher Volumenänderung muss sich daher das Kunstharz mehr ausdehnen. Entsprechend grösser wird das Expansionsverhältnis bei einer kleinen Porenziffer.



Abbildung 19: Reaktionskurven e = 0.50

Abbildung 20: Reaktionskurven e = 0.70



BU INSTITUT FÜR BAU UND UMWELT

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter

Poissonzahl In den Abbildungen 21 und 22 ist erkennbar, dass sich die Reaktionskurven der analytischen Berechnung mit grösser werdender Poissonzahl des Bodens zu grösseren Grenzflächendrücken hin verschieben. Grund dafür kann sein, dass wegen der grösseren Poissonzahl die Kompressibilität des Bodens sinkt und grössere Drücke aufgebaut werden können. Die Reaktionskurven aus Plaxis steigen bei kleiner Poissonzahl, vermutlich aus demselben Grund wie oben beschrieben, anfangs steiler an. Es sind bereits bei kleineren Grenzflächendrücken höhere Expansionsverhältnisse vorhanden. Dies gilt sowohl für das plane strain wie auch für das achsensymmetrische Modell.



Abbildung 21: Reaktionskurven v = 0.25

Tiefe



Da in den grösseren Tiefen höhere Drücke vor der Expansion der Injektion um den Wulst wirken, sind auch andere Reaktionskurven zu erwarten. Mit zunehmender Tiefe werden die analytisch und numerisch ermittelten Grenzflächendrücke für bestimmte Ausdehnungsverhältnisse grösser. Auffallend ist die grosse Abweichung der Plaxis plane strain Kurve von den analytischen Kurven in einer Tiefe von -0.50 m ab OK Terrain. Der Unterschied kann auf die anderen Randbedingungen in der analytischen Berechnung zurückgeführt werden. Es ist zu beachten, dass die auf dem Terrain aufliegende Bodenplatte eine 10-fach grössere Steifigkeit besitzt als der Boden. Dieser Einfluss wird in der analytischen Berechnung vernachlässigt.



Abbildung 23: Reaktionskurven z = -0.50 m

Abbildung 24: Reaktionskurven z = -2.5 m





Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Parameter

## 5.3 Folgerungen aus der Sensitivitätsanalyse

Beim Variieren der oben beschriebenen Parameter wurden teilweise Unterschiede festgestellt. Die Unterschiede liessen sich jedoch immer auf eine plausible Begründung zurückführen. Betrachtet man das Expansionsverhältnis und den Grenzflächendruck speziell im Gleichgewichtszustand (Schnittpunkt mit der rheologischen Kurve des Kunstharzes) stellt man fest, dass diese Werte dennoch nicht gross variieren (unterschiedliche Tiefen ausgeschlossen). Der Gleichgewichtsgrenzflächendruck P<sub>C</sub> des plane strain Modells liegt immer zwischen 200 und 230 kN/m<sup>2</sup>. Das dazugehörende Ausdehnungsverhältnis R<sub>C</sub> liegt zwischen 8.5 und 9.0. Die Werte des achsensymmetrischen Modells variieren beim Ausdehnungsverhältnis R<sub>C</sub> zwischen 6.0 und 7.0 und beim Grenzflächendruck P<sub>C</sub> zwischen 310 und 360 kN/m<sup>2</sup>.

Zwischen den beiden Plaxis Modellen ergeben sich teilweise beachtliche Unterschiede. Dies ist auf die verschiedenen Randbedingungen bei der Berechnung zurückzuführen. Ein achsensymmetrisches zweidimensionales Modell breitet sich auch in die Tiefe aus, wobei beim plane strain Modell eine Modelltiefe nicht beachtet wird. Nichts desto trotz fällt beim Vergleich der numerischen mit den analytischen Reaktionskurven auf, dass beide Plaxis Modelle plausible Resultate liefern. Sie liegen jeweils nahe an einer der beiden analytischen Kurven.

Der Vergleich der Kurven veranschaulicht, dass für die Expansion der Injektionen die vorherrschenden Spannungen im Boden und die Randbedingungen der Berechnungen eine grosse Rolle spielen. Für komplexere zweidimensionale Modelle, bei denen nur eine plane strain Modellierung möglich ist, können Reaktionskurven ähnlich zu den analytischen Theorien erzeugt werden.



Ergebnisse der numerischen Berechnung des betrachteten Projekts

## 6 Ergebnisse der numerischen Berechnung des betrachteten Projekts

Der folgende Abschnitt fasst die Ergebnisse der Berechnung des numerischen Modells zusammen. Wie bereits erklärt, wurde ein plane strain Modell in Plaxis 2D erstellt.

## 6.1 Reaktionskurven des Bodens

Zuerst mussten die Reaktionskurven der einzelnen Injektionspunkte generiert werden, um anschliessend den Expansionsdruck und das Expansionsverhältnis im Gleichgewicht mit der rheologischen Kurve des PUR-Harzes zu ermitteln. Wie beim Modellaufbau erklärt, wurden die einzelnen Injektionsebenen (-0.50, -1.50, -2.50 m ab OK Terrain) nacheinander expandiert. Nach jeder Injektion verändern sich die vorherrschenden Spannungsverhältnisse im Boden, was die nachfolgenden Injektionen beeinflusst.

Injektionen Ebene A Abbildung 25 zeigt die Reaktionskurve (rot dargestellt) des Injektionspunkts A3. Man sieht, dass der Grenzdruck des Bodens erreicht wurde. Die Ausdehnung nimmt zu, ohne dass der Grenzflächendruck weiter ansteigt. Alle Injektionen dieser Ebene erzeugten ähnliche Reaktionskurven. Bei allen Punkten wurde der Grenzdruck erreicht. In Tabelle 5 sind die entsprechenden Expansionsdrücke und -verhältnisse im Gleichgewicht aufgelistet.



Abbildung 25: Reaktionskurve Injektionspunkt A3

Tabelle 5: Expansionsdrücke und -verhältnisse im Gleichgewicht, Injektionsebene A (-0.5 m ab OK T.)

INSTITUT FÜR

BAU UND UMWELT

Injektions- punkt	P <sub>c</sub> [kN/m²]	R <sub>c</sub> [-]
A1	61	17.02
A2	88	14.45
A3	76	15.48
A4	71	15.95
A5	75	15.57
A6	75	15.57

Injektionen Ebene B Nachdem die Injektionen der Ebene A bis zum Ausdehnungsverhältnis am Gleichgewicht expandiert wurden und somit neue Spannungen im Boden herrschten, wurden die Reaktionskurven der zweiten Injektionsebene ermittelt. In Abbildung 26 ist jene des Injektionspunkts B3 gezeigt. Auch bei diesen Injektionen war die Reaktion des Untergrunds in allen Injektionspunkten ähnlich, und der Grenzdruck des Bodens wurde wiederum erreicht. Tabelle 6 enthält die Gleichgewichtswerte der Injektionen der Ebene B.



#### Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz



Ergebnisse der numerischen Berechnung des betrachteten Projekts



Tabelle 6: Expansionsdrücke und -verhältnisse im Gleichgewicht, Injektionsebene B (-1.5 m ab OK T.)

Injektions- punkt	Pc [kN/m²]	Rc [-]
B1	99	13.63
B2	107	13.09
B3	125	12.04
B4	113	12.72
B5	106	13.16
B6	95	13.91

Abbildung 26: Reaktionskurve Injektionspunkt B3

Injektionen Ebene C Nachdem die Injektionen der Ebenen A und B bis zum Gleichgewichtsexpansionsverhältnis expandiert wurden, konnte die Reaktion des Bodens auf die Injektionen in 2.5 Meter Tiefe untersucht werden. In Abbildung 27 ist die Reaktionskurve der Injektion C3 dargestellt. Auf dieser Injektionsebe wurden die höchsten Expansionsdrücke berechnet, wobei auch hier der Grenzdruck des Bodens erreicht wurde. In Tabelle 7 sind die Expansionsdrücke und -verhältnisse der Injektionen C1 bis C6 zusammengefasst.



Abbildung 27: Reaktionskurve Injektionspunkt C3

 Tabelle 7: Expansionsdrücke und -verhältnisse im
 Gleichgewicht, Injektionsebene C (-2.5 m ab OK T.)

 Injektions Pc
 Rc

njektions- punkt	Pc [kN/m²]	Кс [-]
C1	146	11.02
C2	141	11.25
C3	144	11.11
C4	146	11.02
C5	148	10.94
C6	138	11.39

Es zeigte sich, dass sich die Injektionspunkte einer jeweiligen Ebene ziemlich ähnlich verhalten. Bei allen Injektionspunkten wurde der Grenzdruck des umliegenden Bodens erreicht. Je tiefer die Injektionen liegen, desto höher ist der Grenzdruck. Das FEM-Programm ist nicht in der Lage die Volumenexpansion, welche zu einem Druckzustand führen würde, der den Grenzdruck übersteigt, zu modellieren. Daher ist die Änderung des Spannungszustandes das einzige brauchbare Ergebnis der numerischen Berechnung.





Ergebnisse der numerischen Berechnung des betrachteten Projekts

## 6.2 Spannungen im Boden

#### Initiale Spannungen Vor den Injektionen des expandierenden Kunstharzes setzten sich die Spannungen im Boden aus dem Überlagerungsdruck und infolge der mit der Flächenlast belasteten Bodenplatte zusammen. Nachfolgend sind die effektiven vertikalen und horizontalen Spannungen im initialen Zustand dargestellt (Abbildung 28).



Abbildung 28: oben: vertikale Spannungen, unten: horizontale Spannungen (1)



#### Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz



Ergebnisse der numerischen Berechnung des betrachteten Projekts

#### Spannungen nach Injektion

Nachdem die Injektionen ausgeführt wurden, änderten die Spannungsverhältnisse. Die neuen effektiven vertikalen und horizontalen Spannungen sind in Abbildung 29 abgebildet.



Abbildung 29: oben: vertikale Spannungen, unten: horizontale Spannungen (2)

Im Bereich um die Injektionen (ca. 0.5 m Reichweite um Injektionspunkt) ist eine Zunahme der Spannungen zu erkennen. Je tiefer die Injektionen liegen, desto grösser fällt die Zunahme aus. Am Ende der Fundationsplatte ist die Spannungszunahme am geringsten. Grund dafür ist wahrscheinlich, dass die initialen Spannungen in diesem Bereich und somit auch die vorherrschenden Druckverhältnisse vor der Injektion am kleinsten waren. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bodeneigenschaften unter der Fundation bis in eine Tiefe von ca. -3.0 m ab OK Terrain verbessert wurden.



BU INSTITUT FÜR BAU UND UMWELT

Quantifizierung der Baugrundverbesserung

## 7 Quantifizierung der Baugrundverbesserung

Das folgende Kapitel beschreibt verschiedene Varianten zur Quantifizierung der Baugrundverbesserung infolge expandierender Kunstharzinjektionen. Die Varianten bieten Ansätze, wie aus den erhaltenen Ergebnissen der numerischen oder analytischen Berechnung auf erhöhte Scher- und Steifigkeitsparameter geschlossen werden kann. Mit den verbesserten Baugrundwerten lassen sich anschliessend die gewünschten Nachweise führen.

## 7.1 Scherfestigkeit für bindige Böden

Allgemein Bei der Verdichtung des Bodens durch die expandierenden Kunstharzinjektionen werden die vertikalen und horizontalen Spannungen erhöht. Dies bedeutet, dass sich der Ruhedruckkoeffizient k<sub>0</sub>, welcher das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Spannung beschreibt, verändert. Der Ruhedruckkoeffizient ist in Formel 14 definiert. Schneider (2005a).

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

Formel 14: Ruhedruckkoeffizient

Wenn sich der Ruhedruckkoeffizient erhöht, ist der Überkonsolidierungsgrad der einzige Parameter, der sich anpassen kann. Durch die Verdichtung des Bodens infolge der Injektionen wird eine Art Überkonsolidierung erzeug. Löst man Formel 14 nach OCR auf, entsteht Formel 15.

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

Formel 15: Überkonsolidierungsgrad

Zur Ermittlung des Überkonsolidierungsgrades sind die neuen Spannungsverhältnisse erforderlich, welche z.B. aus der FEM-Berechnung gewonnen werden können.



Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz

BAU UND UMWELT

Quantifizierung der Baugrundverbesserung

#### Variante 1



Abbildung 30: Verhalten von überkonsolidiertem, bindigem Boden

Überkonsolidierte bindige Böden verhalten sich so, dass die Vorbelastung in Form von Kohäsion gespeichert werden kann. Die obenstehende Abbildung 30 versucht das Verhalten anhand einer einfachen Überlegung zu erklären. Der Boden verhielt sich normal konsolidiert, als die Geländeoberkante am höchsten war. Es herrschte keine Kohäsion. Als der Boden abgetragen wurde, blieb die Überlagerung in Form von Kohäsion (in Abhängigkeit der maximalen Überlagerungshöhe) bestehen. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Kohäsion ab, da die Überkonsolidierung geringer wird. Lang, H.J. et al. (2007); Schneider (2014).

$$OCR = \frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_{v}} = \frac{\gamma \cdot (z + z_{max})}{\gamma \cdot z}$$
$$z_{max} = (OCR - 1) \cdot z$$

$$c' = \tan(\varphi') \cdot z_{max} \cdot \gamma = \tan(\varphi') \cdot (OCR - 1) \cdot \sigma'_{v}$$
  
Formel 16: Kohäsion infolge Überkonsolidation (1)

Die Scherfestigkeit wird einzig um die Kohäsion verbessert. Zur Berechnung sind lediglich die neuen Spannungsverhältnisse im Boden zu ermitteln. Die Kohäsion infolge der Überlagerung tritt, anders als z.B. eine scheinbare Kohäsion, nur auf, wenn im Boden Spannungen vorhanden sind. Die Kohäsion ist in der Formel 16 definiert.



#### Variante 2



Abbildung 31: Scherfestigkeitsverhalten von bindigen Böden

Ein anderer Ansatz stützt sich auf das typische Verhalten von bindigen Böden in Direktscherversuchen. Dieses wird in Abbildung 31 dargestellt. Ein normal konsolidierter, locker gelagerter Boden bricht bei einer kritischen Scherfestigkeit T<sub>k</sub> mit einem Reibungswinkel  $\varphi$ 's (auch Winkel der Gesamtscherfestigkeit genannt) sowie ohne Kohäsion. Ist der Boden überkonsolidiert, erreicht er in einem Direktscherversuch einen Peak-Wert. Die hier erreichte Scherfestigkeit ist die maximale Scherfestigkeit T<sub>f</sub> mit dem Reibungswinkel  $\varphi$ ' und der Kohäsion c'. Ist der Peak überschritten, stellt sich auch bei überkonsolidiertem Material die kritische Scherfestigkeit ein. Wird der Scherweg immer grösser, kann sich die Scherfestigkeit bis zur Restscherfestigkeit T<sub>R</sub>, mit dem Restreibungswinkel  $\varphi$ '<sub>R</sub> sowie ohne Kohäsion, weiter verringern.

Zwischen den verschiedenen Reibungswinkeln und zwischen der Kohäsion und der Vorbelastung bestehen rechnerische Beziehungen. Hettler (2000); Kolymbas (2011).

$$\tan(\varphi'_{S}) = \tan(\varphi') + \tan(\varphi'_{R})$$
$$c' = \sigma'_{v,max} \cdot \tan(\varphi'_{R})$$



Abbildung 32: Scherfestigkeit von OC Boden

Im Bereich von  $0 < \sigma' < \sigma'_{v, max}$  stellt sich demnach die Scherfstigkeit in Formel 17 ein.

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi')$$

Formel 17: Scherfestigkeit OC

Ist die Vorbelastungsspannung überschirtten gilt, das Bruckkriterium nach Formel 18. Kolymbas (2011).

$$\tau = \sigma' \cdot \tan(\varphi'_{\rm s})$$

Formel 18: Scherfestigkeit NC

Die Kohäsion infolge der Überkonsolidation errechnet sich nach Formel 19.

$$c' = \sigma'_{v} \cdot OCR \cdot tan(\varphi'_{R})$$

Formel 19: Kohäsion infolge Überkonsolidation (2)





Zur Berechnung ist, zusätzlich zu den neuen Spannungsverhältnissen im Boden, der Restreibungswinkel erforderlich.

Bewertung Die Variante 1 ist insofern einfacher in der Anwendung, als dass nur die Spannungen im Boden nach den Injektionen des Kunstharzes zur Berechung nötig sind. Die Variante 2 setzt die Kenntnis über die verschiedenen Reibungswinkel des Materials voraus, welche nur mit Laborversuchen aufwändig bestimmbar sind.

Bei beiden Varianten die Kohäsion verloren geht, wenn zu grosse Scherdeformationen eintreten. Dies ist zwingend zu beachten.

## 7.2 Scherfestigkeit für nichtbindige Böden

Bei nichtbindigen, grobkörnigen Böden ist nur eine sehr kleine oder praktisch keine Kohäsion infolge Überlagerung vorhanden. Durch die verdichtete Lagerung des Bodens kann jedoch ein grösserer Reibungswinkel angerechnet werden.



Scherweg

Abbildung 33: Scherfestigkeitsverhalten von nichtbindigen Böden

Dicht gelagerte Böden weisen in einem Direktscherversuch einen Maximalwert der Scherfestigkeit  $\tau_{max}$  auf. Im  $\sigma$ '- $\tau$ -Diagramm macht sich dies mit einem grösseren Reibungswinkel und einer allfälligen Kohäsion bemerkbar (Abbildung 33). Ist der Höhepunkt überschritten, gleicht sich die Scherfestigkeit des dichten Bodens der Restscherfestigkeit  $\tau_R$  an. Die Restscherfestigkeit ist zugleich die Scherfestigkeit welche, ein locker gelagerter Boden realisieren kann. Lang, H.J. et al. (2007); Schneider (2014).

Der Tangens des Restreibungswinkels  $\varphi'_R$ ist um den Tangens der Dilatanz  $\psi$  kleiner als der Tangens des maximalen Reibungswinkels  $\varphi'_{max}$ . Die Dilatanz beschreibt eine Volumenzunahme im Boden, wenn sich die einzelnen Körner eines dichten Bodens aneinander vorbeischieben müssen. Kolymbas (2011).

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



Abbildung 34: Scherfestigkeit nichtbindiger Boden nach Verdichtung



BU INSTITUT FÜR BAU UND UMWELT

Quantifizierung der Baugrundverbesserung

Der Ansatz sieht nun vor, dass nach der Verdichtung des Bodens durch die expandierenden Kunstharzinjektionen der grössere Reibungswinkel  $\varphi'_{max}$  angerechnet werden darf. Entweder wird dazu die Dilatanz geschätzt oder die Reibungswinkel werden im Labor ermittelt. Werden Laborversuche durchgeführt, ist es denkbar, dass je nach Bodenzusammensetzung zusätzlich noch eine Kohäsion gemessen wird.

Variante 2 Die zweite Variante zur Quantifizerung der Scherfestigkeitsverbesserung von nichtbindigen Böden stützt sich auf eine empirische Beziehung, welche aussagt, dass das Produkt aus dem Tangens des Reibungswinkels und der Porosität in etwa konstant ist. Lang, H.J. et al. (2007).

$$n \cdot \tan(\varphi') \approx konstant$$

Diese empirisch gefundene Beziehung kann mithilfe der folgenden Definitionen umgeformt werden.

$$n = rac{e}{1+e}$$
,  $arepsilon_V = rac{\Delta V}{V}$ ,  $arepsilon_V = -rac{\Delta e}{1+e}$ 

$$n_0 \cdot \tan(\varphi') \approx n_{neu} \cdot \tan(\varphi'_{max})$$

$$\tan(\varphi'_{max}) = \frac{e_0 \cdot (\varepsilon_V - 1)}{e_0 \cdot (\varepsilon_V - 1) + \varepsilon_V} \cdot \tan(\varphi')$$

Formel 20: maximaler Reibungswinkel

Der Reibungswinkel wird um einen Faktor, in Abhängigkeit der Porenziffer und der volumetrischen Dehnung infolge der Verdichtung, erhöht (Formel 20). Dazu ist die Kenntnis dieser beiden Werte erforderlich. Diese sind jedoch nur sehr schwer und aufwändig zu ermitteln, weshalb eine Schätzung zweckmässig wäre.

Bewertung Die Verbesserung der Bodenkennwerte von nichtbindigen Böden kann nur abgeschätzt oder mit Laborversuchen ermittelt werden. Eine Bestimmung mithilfe der aus den Berechnungen gewonnenen Spannungsänderungen ist nicht möglich. Somit stellt sich Variante 1 in den Vordergrund. Die Schätzung des Reibungswinkels ist wesentlich einfacher, als die Schätzung der initialen Porenziffer oder der volumetrischen Dehnung infolge der Verdichtung des Bodens.

Wie bei den bindigen Böden ist auch hier anzufügen, dass sich bei grossen Scherdeformationen die Restscherfestigkeit einstellt. Die Verbesserung kann also nur bis zu bestimmten Deformationen im Boden angerechnet werden.



BU INSTITUT FÜR BAU UND UMWELT

Quantifizierung der Baugrundverbesserung

## 7.3 Steifigkeit



Abbildung 35: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Da der Boden durch die Injektionen verdichtet wird, verändert sich dessen Steifigkeit. Dies wird mit dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 35 schematisch erklärt. Vor der Ausführung der Injektionen wird im Oedometerversuch die oben schwarz dargestellte Kurve ermittelt. Durch die Verdichtung nimmt die Dehnung im Boden zu und die Porenziffer verkleinert sich. Gleichzeitig entsteht eine Art Überkonsolidierung bis zu einer bestimmten Vorbelastungsspannung  $\sigma'_{v, max}$ . Die Kurve verschiebt sich im Diagramm im Bereich  $\sigma' = 0$  bis  $\sigma'_{v, max}$  nach unten und wird flacher (rot dargestellt). Überkonsolidierte Böden haben bis zur Vorbelastung einen sogenannten ME'-Wert, welcher etwa 3 bis 10 Mal grösser ist als der ME-Wert der Erstbelastung. Dies kann ausgenutzt werden. Wird die Überkonsolidierung überschritten, ist wieder der ME-Wert (Erstbelastung, schwarze Kurve) wirksam.

Zur Quantifizierung der Verbesserung ist ein Oedometerversuch mit verschiedenen Be- und Entlastungsstufen erforderlich. Dadurch lassen sich die Steigungen der Erstund Wiederbelastungskurven ermitteln. Die Wiederbelastungsgerade kann anschliessend parallel durch den Schnittpunkt der Erstbelastungsgerade und der Vorbelastungsspannung verschoben werden (Bestimmung der Vorbelastung nach Ohde). Somit ist der neue ME-Wert im Spannungs-Dehnungs-Diagramm definiert (rote Kurve bis  $\sigma'_{v, max}$ , anschliessend nach  $\sigma'_{v, max}$  wieder Erstbelastung). Schneider (2005b).



Quantifizierung der Baugrundverbesserung

### 7.4 Quantifizierung der Baugrundverbesserung für das betrachtete Projekt

Scherfestigkeit Die Verbesserung der Scherfestigkeit im betrachteten Projekt wurde anhand der Vakante 1 für bindige Böden quantifiziert. Dazu wurden die vertikalen und horizontalen Spannungen nach der Ausführung der Injektionen, welche im numerischen Modell berechnet wurden, in Schritte von jeweils 10 kN/m<sup>2</sup> eingeteilt. Weiter wurde im Untergrund in einen 50 x 50 cm Raster festgelegt. So konnte für jeden Rasterkasten die vertikale und horizontale Spannung auf 10 kN/m<sup>2</sup> genau ermittelt werden.

> Unter Anwendung der Beziehungen aus Variante 1 für bindige Böden wurden der Überkonsolidierungsgrad OCR und daraus die Kohäsion infolge der Überkonsolidierung bestimmt und über Schichten von einem Meter Stärke gemittelt.



Abbildung 36: Überkonsolidierungsgrad

Abbildung 37: Kohäsion infolge Überkonsolidierung

Abbildungen 36 und 37 zeigen die Überkonsolidierung und die Kohäsion im Bodenmodell von -6.00 (linker Rand der Fundation) bis 0.00 (Mitte der Fundation). Der OCR liegt bis in drei Meter Tiefe zwischen 3.1 bis 12.7. Tiefer als -3 m ab OK Terrain ist keine Überkonsolidierung mehr vorhanden und somit auch keine Kohäsion. Die vorhandene Kohäsion variiert je nach Schicht zwischen 42.2 bis 273.2 kN/m<sup>2</sup>. Die erhaltenen Werte für die Kohäsion sind sehr hoch. Es wird kaum ein Wert von 273.2 kN/m<sup>2</sup> erreicht werden. Deshalb macht es Sinn, einen maximalen Wert festzulegen. Die Richtwerte in Tabelle 8 geben einen Anhaltspunkt.





Quantifizierung der Baugrundverbesserung

Tabelle 8: Richtwerte für Kohäsion, Abschätzung gemäss SN 670 010. Schneider (2014).

Bezeichnung	USCS	Kohäsion c'
Kiese mit wenig Feinanteilen	GW, GP, GM, GC	0 kN/m <sup>2</sup>
siltige bis tonige Kiese	GM-ML, GM-GC, GC-CI, GC-CH	0 - 8 kN/m <sup>2</sup>
Sande mit wenig Feinanteilen	SW, SP, SM, SC	0 kN/m <sup>2</sup>
siltige bis tonige Sande	SM-ML, SM-SC, SC-CL, SC-CH	0 - 20 kN/m <sup>2</sup>
Silte, tonige Silte, Tone	ML, CL-ML, CL, CH	0 - 35 kN/m <sup>2</sup>
tonige Silte und Tone mit organi- schen Beimengungen	OL, OH	5 - 15 kN/m²
spezielle Silte, Seekreide	MH	0 - 10 kN/m <sup>2</sup>

Für das betrachtete Projekt wurde unter Berücksichtigung der Richtwerte eine maximale Kohäsion von 10 bis 25 kN/m<sup>2</sup> festgelegt. Im Bereich unter der Fundationsplatte bis in eine Tiefe von -3 m ab OK Terrain weist der Baugrund nach der Injektion des Kunstharzes folgende Scherfestigkeitsparameter auf:

- effektiver Reibungswinkel φ': 25 °
- effektive Kohäsion c':10 bis 25 kN/m<sup>2</sup>





Quantifizierung der Baugrundverbesserung

#### Steifigkeit

Vor der Injektion hatte die Bodenschicht unter dem Fundament einen ME-Wert von ca. 5'000 kN/m<sup>2</sup>. Daraus konnte auf einen C<sub>C</sub>-Wert von etwa 0.048 geschlossen werden. Der C<sub>S</sub>-Wert der Wiederbelastung wurde mit 0.015 abgeschätzt. So konnte das idealisierte Spannungs-Porenziffer-Diagramm in Abbildung 38 erstellt werden. Der OCR aus der vorhergehenden Berechnung wurde über die ganze, drei Meter starke Bodenschicht unter der Fundationsplatte gemittelt. Daraus konnte auf die neue, mittlere Vorbelastungsspannung infolge der Injektionen geschlossen werden. Sie beträgt rund 384 kN/m<sup>2</sup>. Die Wiederbelastungsgerade wurde anschliessend durch den Schnittpunkt von Erstbelastungsgerade und Vorbelastungsspannung parallel verschoben. Die Ermittlung des verbesserten ME-Wertes oder ME<sup>c</sup>-Wertes erfolgt nun mithilfe des C<sub>S</sub>-Wertes.



Abbildung 38: idealisiertes Spannungs-Porenziffer-Diagramm

Im Diagramm stellt die schwarze Kurve den ME-Wert vor der Injektion dar. Diese hat bei ca. 60 kN/m<sup>2</sup> einen Knick, da bis dorthin die Probe (aus einer Tiefe von -1.50 m ab OK Terrain) in einem Oedometer eine Wiederbelastung erfahren würde. Die Wiederbelastungskurve wird durch den Schnittpunkt von Erstbelastungsgeraden und Vorbelastungsspannung, erzeugt durch die Injektion, parallel verschoben (rote Kurve). Bis zur neuen Vorbelastungsspannung wird die Steifigkeit des Untergundes nun mit dem ME<sup>-</sup>-Wert beschrieben.

Für das betrachtete Projekt ergibt sich ein verbesserter Zusammendrückungsmodul von etwa 13'500 kN/m<sup>2</sup>.



## 8 Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt

Durch die Injektion wurde der Boden unter der Fundationsplatte bis in eine Tiefe von ca. -3.0 m verbessert (Abbildung 39). In diesem Teil des Berichts folgen die Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt unter Berücksichtigung dieser Baugrundverbesserung.

INSTITUT FÜR

BAU UND UMWELT



Abbildung 39: Baugrund, links: vor Injektion, rechts: nach Injektion

#### 8.1 Bemessungswerte

Zur Ermittlung der neuen Spannungen im Boden und der Baugrundverbesserung wurden charakteristische Werte verwendet, um möglichst die vorhandenen Verhältnisse abzubilden. Für die Nachweise müssen die Baugrundwerte durch den Partialfaktor  $\gamma_m$  dividiert werden. Dadurch werden ungünstige Abweichungen der Baugrundeigenschaften von ihrem charakteristischen Wert berücksichtigt. In Tabelle 9 sind die Partialfaktoren aufgeführt. SIA (2013).

#### Tabelle 9: Partialfaktoren nach Swisscode

Parameter	Tragsicherheit γ <sub>m</sub>	Gebrauchstaug- lichkeit γ <sub>m</sub>
Tangens des eff. Rei- bungswinkels tan(φʻ)	1.2	1.0
effektive Kohäsion c'	1.5	1.0
ME-Wert ME	1.5	1.0

Die so errechneten Baugrundparameter auf Design-Niveau für die Nachweise am betrachteten Projekt sind Tabelle 10 zusammengefasst. Sowohl für den Boden vor der Injektion wie auch für den Boden im Bereich der Baugrundverbesserung.



U INSTITUT FÜR BAU UND UMWELT

Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt

#### Tabelle 10: Bemessungswerte

Parameter	Charakteristisch X <sub>k</sub>	Tragsicherheit X <sub>d</sub>	Gebrauchstaug- lichkeit X <sub>d</sub>
Boden vor Injektion			
eff. Reibungswinkel φ'	25.0 °	21.2 °	25.0 °
effektive Kohäsion c'	0.0 kN/m <sup>2</sup>	0.0 kN/m <sup>2</sup>	0.0 kN/m <sup>2</sup>
ME-Wert ME	5'000 kN/m <sup>2</sup>	3'300 kN/m <sup>2</sup>	5'000 kN/m <sup>2</sup>
E-Modul E	3'000 kN/m <sup>2</sup>	2'000 kN/m <sup>2</sup>	3'000 kN/m <sup>2</sup>
Boden verbessert (unter			
eff. Reibungswinkel φ'	25.0 °	21.2 °	25.0 °
effektive Kohäsion c'	10.0 - 25.0 kN/m <sup>2</sup>	6.7 - 16.7 kN/m <sup>2</sup>	10.0 - 25.0 kN/m <sup>2</sup>
ME-Wert ME	13'500 kN/m <sup>2</sup>	9'000 kN/m <sup>2</sup>	13'500 kN/m <sup>2</sup>
E-Modul E	8'100 kN/m <sup>2</sup>	5'400 kN/m <sup>2</sup>	8'100 kN/m <sup>2</sup>

## 8.2 Tragsicherheit

Gemäss Norm sind folgende Grenzzustände der Tragsicherheit zu untersuchen:

- Kippen als Grenzzustand des Gleichgewichts (GZ Typ 1)
- Erreichen des inneren Tragwiderstands des Fundaments (GZ Typ 2)
- Grundbruch und Gleiten durch Erreichen des Baugrundwiderstands (GZ Typ 2)
- Geländebruch durch Erschöpfen der Scherfestigkeit des Bodens bzw. des Baugrundwiderstands (GZ Typ 3)
- Erreichen des inneren Tragwiderstands des Tragwerks, verursacht durch Fundamentsetzungen oder übermässige Bodenbewegungen (GZ Typ 2) SIA (2013).

Da am betrachteten Projekt nur eine gleichmässig verteilte, vertikale Flächenlast berücksichtigt wird und keine horizontalen Kräfte angreifen, fallen die Nachweise des Gleitens oder Kippens weg. Zudem wird nur der Baugrund betrachtet, weshalb keine Nachweise des inneren Tragwiderstands des Tragwerks geführt werden. Somit wurden die folgenden Grenzzustände der Tragsicherheit betrachtet:

- Gesamtstabilität / Geländebruch (GZ Typ 3)
- Grundbruch (GZ Typ 2)
- Gesamtstabilität /<br/>GeländebruchFür den Nachweis des Grenzzustandes der Gesamtstabilität und des Geländebruchs<br/>wurde in Plaxis 2D ein einfaches Modell gemäss Abbildung 39 erstellt. Sämtliche Materi-<br/>alparameter wurden auf Design-Niveau eingegeben und das Fundament wurde mit der<br/>verteilten Flächenlast von  $q_d = 37.8 \text{ kN/m}^2$  (GZ 3) belastet. Anschliessend wurde in<br/>Plaxis eine phi-c-Reduktion durchgeführt und der Sicherheitsfaktor SF =  $R_d$  /  $E_d$  ermittelt.<br/>Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Taballa 11. Widerstand gagen Caländebruch / Cocomtatabilität

Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt

rabelle 11: widerstand gegen Gelandebruch / Gesamtstabilität				
Zustand	Kohäsion c' <sub>d</sub>	Sicherheitsfaktor SF	Steigeru	
Vor der Injektion	0 kN/m <sup>2</sup>	1.68	-	
Nach der Injektion, mit ver- bessertem Boden unter Fun- dation bis -3.0 m ab OK T.	6.7 kN/m <sup>2</sup>	2.39	+ 42%	
	13.3 kN/m <sup>2</sup>	2.95	+ 76%	
	$16.7  k N m^2$	2 22	1 0.00/	

16.7 kN/m<sup>2</sup>

Da im Bereich des verbesserten Bodens eine Kohäsion wirkt, erhöht sich die Sicherheit gegenüber vor der Injektion erheblich. Schon mit zusätzlichen 6.7 kN/m<sup>2</sup> Kohäsion wird eine Steigerung der Sicherheit um 42% erreicht. Liegt die Kohäsion des verbesserten Bodens bei 16.7 kN/m<sup>2</sup>, ist sogar eine Verdopplung der Sicherheit möglich. Der Nachweis für diesen Grenzzustand ist erfüllt.

3.32

#### Grundbruch Der Baugrundwiderstand gegen Grundbruch wurde mit einer Handrechnung ermittelt. Diesmal musste die Flächenlast von q<sub>d</sub> = 49.1 kN/m<sup>2</sup> für den Grenzzustand 2 angesetzt werden. In Tabelle 12 sind die Widerstände, berechnet mit den Bemessungswerten vor und nach der Verbesserung, aufgeführt.

Tabelle 12: Widerstand gegen Grundbruch (1)

Zustand	Kohäsion Cʻ <sub>d</sub>	Widerstand R <sub>N,d</sub>
Vor der Injektion	0 kN/m <sup>2</sup>	29'622 kN
Nach der Injektion	6.7 kN/m <sup>2</sup>	43'827 kN
	13.3 kN/m <sup>2</sup>	57'820 kN
	16.7 kN/m <sup>2</sup>	65'028 kN

Gemäss Abbildung 40 muss beachtet werden, dass nur ein kleiner Teil der Gleitfläche im Bereich des verbesserten Baugrunds liegt, nämlich ca. 8%. Dadurch kann der Nachweis nicht ausschliesslich mit verbesserten Bodenkennwerten geführt werden.



Abbildung 40: abgeschätzte Gleitfläche

Der Widerstand des verbesserten Baugrunds wurde deswegen gemittelt. Er setzt sich aus 8% des Widerstandes mit verbesserten und 92% des Widerstandes mit unveränderten Bodenparametern zusammen. Tabelle 13 listet die ermittelten Widerstände auf.

INSTITUT FÜR

BAU UND UMWELT

+ 98%

rung



Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt

#### Tabelle 13: Widerstand gegen Grundbruch (2)

Zustand	Kohäsion Cʻd	$\begin{array}{c} \text{Widerstand} \\ R_{\text{N,d}} \end{array}$	Sicherheits- faktor SF	Steige- rung
Vor der Injektion	0 kN/m <sup>2</sup>	29'622 kN	5.92	-
Nach der Injektion, mit ver- bessertem Boden unter Fun- dation bis -3.0 m ab OK T.	6.7 kN/m <sup>2</sup>	30'758 kN	6.14	+ 4%
	13.3 kN/m <sup>2</sup>	31'878 kN	6.37	+ 8%
	16.7 kN/m <sup>2</sup>	32'455 kN	6.48	+ 9%

INSTITUT FÜR

BAU UND UMWELT

Vor der Baugrundverbesserung wurde ein Sicherheitsfaktor SF =  $R_d/E_d$  von 5.92 erreicht. Nach der Verbesserung liegt er zwischen 6.14 bis 6.48. Der Widerstand gegen Grundbruch wurde infolge der Injektion um nur 4 bis 9% erhöht. Grund dafür ist, dass nur ein kleiner Teil der Gleitfläche, an welcher der Bodenwiderstand mobilisiert wird, im verbesserten Boden liegt. Betrachtet man die Grösse der Sicherheitsfaktoren, fällt jedoch auf, dass ein Eintreten eines Grundbruchs im Vorfeld schon sehr unwahrscheinlich war. Nichts desto trotz wird eine Steigerung durch die Injektionen erzielt. Der Nachweis ist erfüllt.





Nachweise nach Swisscode für das betrachtete Projekt

## 8.3 Gebrauchstauglichkeit

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit verlangt die Norm die Untersuchung der folgenden Grenzzustände:

- Gleichmässige und ungleichmässige Setzungen, Verschiebungen und Verkippungen
- Schwingungen durch Resonanzerscheinungen SIA (2013).

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wurden am betrachteten Projekt die gleichmässigen Setzungen untersucht.

Setzungen Die Setzungen wurden in Abhängigkeit der Auflast q<sub>d</sub> bestimmt. Es wurden Handrechnungen durchgeführt, unter Annahme von durchlaufenden Bodenschichten. Die Spannungsausbreitung der Auflast im Boden wurde sowohl mit der 2:1-Methode, wie auch nach Boussinesq im kennzeichnenden Punkt bestimmt. Tabelle 14 stellt die Setzungen in Abhängigkeit der Auflast q<sub>d</sub> dar.

#### Tabelle 14: Setzungen s [mm] in Abhängigkeit der Auflast qd [kN/m²]

	Vor der Injektion	Nach der Injektion	Reduktion
Berechnung 2:1 Methode	1.00 · q <sub>d</sub>	0.712 · q <sub>d</sub>	- 29%
Berechnung Boussinesq	0.977 · q <sub>d</sub>	0.679 · q <sub>d</sub>	- 30%

Die Ergebnisse zeigen, dass nach der Baugrundverbesserung zukünftig kleinere Setzungen zu erwarten sind. Durch die Injektionen von expandierendem Kunstharz reduzieren sich die Setzungen um rund 30%. Dies bedeutet, dass z.B. bei Aufstockungen von Gebäuden, unter welchen die Injektionen durchgeführt wurden, kleinere Setzungen infolge der neuen Belastung entstehen. Nicht zu vergessen ist, dass mit der Injektion von expandierendem Kunstharz bestehende Gebäude, welche sich gesetzt haben, wieder angehoben werden können. Dazu wird die Hebung vor Ort bei der Ausführung laufend überwacht. Die oben berechneten Setzungen entstehen lediglich infolge von zukünftigen Mehrbelastungen und berücksichtigen eine Hebung des Bauwerks nicht.



Schlussfolgerungen



## 9 Schlussfolgerungen

#### Ergebnisse

Der Baugrund unter bestehenden Gebäuden kann mit Injektionen von expandierendem Kunstharz erheblich verbessert werden. Sowohl bei der Tragfähigkeit wie auch bei der Setzungsempfindlichkeit weist ein, durch Kunstharz verbesserter Boden, bessere Eigenschaften auf. Da die Methode in der Praxis einfach auszuführen ist und keine grossen Installationen benötigt, bietet die Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz eine beachtliche Tragfähigkeitssteigerung bei minimalen baulichen Eingriffen am bestehenden Bauwerk.

Am betrachteten Projekt wurde eine Tragfähigkeitssteigerung bis 98% erreicht. Zudem werden zukünftige Setzungen, beispielsweise infolge einer Aufstockung, rund 30% kleiner. Dies sind wichtige Erkenntnisse, vor allem wenn der Umbau eines Bauwerks geplant wird und der Baugrund daraus eine Mehrbelastung erfährt.

Die Modellierung zur Berechnung und Analyse der Baugrundverbesserung ist praktisch nur mit einem numerischen Programm zu bewältigen. Die vorhandenen analytischen Ansätze sind nur bei einzelnen Injektionspunkten aussagekräftig. Sind mehrere Injektionspunkte nebeneinander oder in einem Raster angeordnet, was in der Praxis der Fall ist, entstehen zu komplexe Randbedingungen für eine analytische Berechnung. Einzig die Modellierungen von einzelnen Injektionspunkten können sowohl numerisch als auch analytisch erfolgen und somit verglichen werden.

Zur Quantifizierung der verbesserten Baugrundeigenschaften wurden verschiedene Varianten vorgeschlagen. Die meisten Varianten setzen jedoch ausführliche Laborversuche am Bodenmaterial voraus. Da in der Realität solche Versuche aus Kosten- und Zeitgründen meist nicht möglich sind, müssen Werte geschätzt werden. Dies ist mit einer gewissen Unsicherheit verbunden.

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Randbedingungen bei den Berechnungen eine wesentliche Rolle spielen. Bereits bei den analytischen Modellen sind Unterschiede festzustellen. In dieser Arbeit wurden zur numerischen Berechnung zweidimensionale FEM-Modelle erstellt. Auch hier ergaben die Modelle unterschiedliche Ergebnisse, je nach angenommenen Randbedingungen. Die leichte Variation der Parameter hat veranschaulicht, dass die Expansion der Injektionen relativ unempfindlich darauf reagiert. Die grossen Unterschiede bestehen nur zwischen den einzelnen analytischen und numerischen Berechnungsansätzen.

Bewertung Die Ergebnisse, sowohl zur Baugrundverbesserung am betrachteten Projekt wie auch der Sensitivitätsanalyse bieten einen guten Überblick zur Wirkungsweise der Injektionen von expandierendem Kunstharz und wie die Baugrundverbesserung durch diese Methode quantifiziert werden kann. Es wurden stets einfache Modelle untersucht, um möglichst die Auswirkungen der Injektionen zu verstehen. In Wirklichkeit sind die vorhandenen örtlichen Situationen aber wesentlich komplexer.





Schlussfolgerungen

Probleme / Offene Punkte Zur Vereinfachung wurde lediglich die Wirkungsweise der Injektionen in grobkörnigen Böden untersucht. Dies stimmt mit dem betrachteten Projekt nicht überein, da dessen Boden eher feinkörnig ist. Da die Injektionen jedoch, unabhängig von Korngrösse, verdichtend wirken, können die Resultate annähernd übertragen werden. Eine zusätzliche Analyse zur Wirkungsweise der Injektionen in feinkörnigen Böden wäre in Zukunft wünschenswert.

> In dieser Arbeit wurden alle Injektionen mit einem zweidimensionalen numerischen Modell untersucht. Eine Modellierung mit einem dreidimensionalen Finite-Elemente-Programm wäre wesentlich komplexer und aufwändiger. Jedoch könnten die Injektionen besser und näher an der Realität abgebildet werden. Da sich die Injektionswulste in alle Richtungen ausdehnen, kann in der Wirklichkeit von einem dreidimensionalen Verhalten ausgegangen werden. Ob die Ergebnisse einer 3D-Modellierung den Aufwand rechtfertigen würden, ist fraglich, zumal die zweidimensionalen Modelle nahe bei den analytischen Berechnungen liegen.

Weiterführende<br/>FragenEs wurden mehrere Varianten zur Quantifizierung der Baugrundverbesserung vorge-<br/>stellt. Ob die verschiedenen Varianten ähnliche Ergebnisse liefern, bleibt offen. Ausführ-<br/>liche Versuche dazu und die Ausarbeitung weiterer Varianten, wären interessant.

Den Berechnungen lagen jeweils sehr einfache Modelle zu Grunde. Die Untersuchung von komplexeren Modellen, z.B. mit anderen Gebäudegeometrien oder mehreren Bodenschichten, sollte weiterverfolgt werden.

Mit der Injektion von expandierendem Kunstharz werden nicht nur die Baugrundeigenschaften verbessert. Durch die Expansion können auch Hebungen erzeugt werden, welche Setzungen kompensieren. Dieser Prozess könnte in Zukunft genauer untersucht werden.

**Empfehlungen** Es wird empfohlen, dass die Baugrundverbesserung durch Injektionen von expandierendem Kunstharz noch genauer untersucht wird und alle weiterführenden Fragen und offenen Punkte geklärt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern lediglich erste Ansätze und Vorgehensweisen zum rechnerischen Tragfähigkeitsnachweis nach Swisscode.





Literatur und Quellenverzeichnis

## 10 Literatur und Quellenverzeichnis

Herkunft der<br/>VorlageDas Dokument wurde auf der Basis einer Vorlage für Technische Berichte erstellt. Die<br/>Vorlage ist ein Element des "Werkzeugkastens Technische Berichte" der Hochschule für<br/>Technik Rapperswil. Sie orientiert sich an Prinzipien des Strukturierten Schreibens.

Verwendete Plaxis 2D, Version 2012.01 Software

> Plaxis bv P.O. Box 572 2600 AN DELFT Netherlands

Literatur Dominijanni, A. & Manassero, M. 2016. Baugrundverbesserung durch Injektion von expandierendem Kunstharz. Leitfaden zur Projektierung. London: McGraw-Hill Education.

Hettler, A. 2000. Gründung von Hochbauten. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Kolymbas, D. 2011. Geotechnik. Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. Berlin Heidelberg: Springer.

Lang, H.J. et al. 2007. Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. Berlin Heidelberg: Springer.

Schneider, H.R. 2014. Geotechnik 2. Bodenmechanik und Grundbau. Scherfestigkeit. Skript zur Vorlesung. Hochschule für Technik Rapperswil HSR.

Schneider, H.R. 2005a. Geotechnik 1. Bodenmechanik und Grundbau. Totale und effektive Spannungen in Böden. Skript zur Vorlesung. Hochschule für Technik Rapperswil HSR.

Schneider, H.R. 2005b. Geotechnik 2. Bodenmechanik und Grundbau. Volumen- und Formänderungen, Lastsetzung, Konsolidation / Zeitsetzung. Skript zur Vorlesung. Hochschule für Technik Rapperswil HSR.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. 2013. SIA 267 Geotechnik. Zürich: SIA.





Abstract

## 11 Erklärung zur Urheberschaft

**Erklärung** Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter angefertigt habe. Ich habe nur die Hilfsmittel benutzt, die ich angegeben habe. Gedanken, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ort/Datum Rapperswil, 21. Juni 2016

Unterschrift

Lukas Berner