

**Institut für  
Bodenmechanik, Grundbau  
und Numerische Geotechnik**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
Roman Marte

Rechbauerstraße 12  
8010 Graz, ÖSTERREICH

Tel.: +43 (0)316 873-6231  
Fax: +43 (0)316 873-6232

[margit.rueckert@tugraz.at](mailto:margit.rueckert@tugraz.at)

[www.soil.tugraz.at](http://www.soil.tugraz.at)

DVR: 008 1833

UID: ATU 574 77 929

## **Einreichung Forschungspreis 2018**

Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen | Arch+Ing

### **Titel Masterarbeit**

## **Numerische Studien zur Bewertung der Standsicherheit von Böschungen**

Original: Numerical studies on slope stability analysis

### **Ersteller**

Dipl.-Ing. Simon Oberhollenzer BSc.

### **Betreuer**

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Tschuchnigg

### **Eingereicht**

April 2017, Technische Universität Graz

## Kurzfassung

Die Bestimmung der Standsicherheit von Böschungen ist für diverse geotechnische Bauvorhaben in Österreich wie auch in vielen Gebieten weltweit von großer Bedeutung. Bedingt durch die geographische Lage im Alpenvorland bzw. in den Alpen werden für die Errichtung von Straßeninfrastruktur, Baugruben oder Beschneigungsspeicher Hanganschnitte generiert, welche oft Sicherungsmaßnahmen (z.B. Vernagelung, Verankerung, Stützkonstruktion) erfordern, um die gemäß *ÖNORM B 1997-1-5: 2017 11 01* geforderten Sicherheitsfaktoren einzuhalten. In diesem Zusammenhang erfolgt die Nachweisführung häufig mittels *Grenz-Gleichgewichtsverfahren*. Da analytische Berechnungsmethoden jedoch keine Aussagen über das Verformungsverhalten erlauben, finden Finite Elemente Analysen in der Praxis vermehrt Anwendung. Im österreichischen Straßen- und Schienennetz erfolgt beispielsweise die Beurteilung von Stützkonstruktionen sowie Brückenobjekten verstärkt auf Basis numerischer Berechnungen, welche eine Bestimmung der Standsicherheit sowie des Verformungsverhaltens der Gesamtkonstruktion ermöglichen.

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, kam es in der Vergangenheit an natürlichen sowie gesicherten Böschungen oft zu kostspieligen Schadensfällen, weshalb einer realistischen Beurteilung der Standsicherheit eine große Bedeutung zugesprochen werden kann. Von diesem Ziel angetrieben, werden in gegenständlicher Masterarbeit die Möglichkeiten analytischer sowie numerischer Berechnungsverfahren ausgearbeitet und Hinweise für die Praxis abgeleitet.



Abbildung 1. Ausgewählte Schadensfälle: (a) Errichtung einer Baugrube in Bad Waltersdorf – Oststeiermark, (b) Versagen einer Baugrubenwand in Obertauern – Salzburg, (c) Böschungsbruch entlang der B99 Katschberg Bundesstraße [Quelle: GDP ZT GmbH]

Die *Grenz-Gleichgewichtsverfahren* (LEA) nach Bishop (1955), Janbu (1954) bzw. Morgenstern & Price (1965) finden in der Geotechnik zur Bestimmung der Standsicherheit von Böschungen (FoS) breite Anwendung. Diverse Annahmen zur Form des Versagens, sowie der Kräfte zwischen den Lamellen ermöglichen keine einheitliche Definition des Sicherheitsfaktors.

Diese Annahmen sind hingegen bei *Strength Reduction Finite Element Analyses (SRFEA)* oder *Finite Element Limit Analyses (FELA)* nicht notwendig. Ersterer Berechnungstyp (*SRFEA*) ermöglicht eine realistische Beurteilung der Standsicherheit für eine assoziierte ( $\psi' = \varphi'$ ) und nicht-assoziierte Fließregel ( $\psi' \neq \varphi'$ ). Die Bestimmung des Sicherheitsniveaus erfolgt durch die sog.  $\varphi'/c'$  Reduktion, bei welcher  $\tan \varphi'$  und  $c'$  gleichzeitig abgemindert werden, bis kein Gleichgewichtszustand mehr erreicht wird. Wie in Formel [1] ersichtlich, kann aus dem Verhältnis der ursprünglichen Scherparameter zu den Scherparametern beim Versagen ( $\varphi'_{mob.}, c'_{mob.}$ ) der Sicherheitsfaktor FoS berechnet werden. In diesem Zusammenhang führen hohe Böschungsneigungen  $> 40^\circ$  in Kombination mit großen Reibungswinkel  $\varphi' > 35^\circ$ , sowie moderaten Dilatanzwinkel  $\psi' < 5^\circ$  zu numerischen Instabilitäten und erlauben keine präzise Definition der Standsicherheit (siehe Abbildung 2 – grüne Linie). Es wird festgehalten, dass mit einer assoziierten Fließregel die plastischen volumetrischen Dehnungen des Bodens und der Sicherheitsfaktor FoS überschätzt werden.

$$FoS = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi'_{mob.}} = \frac{c'}{c'_{mob.}} \quad [1]$$

Basierend auf zweiterem Berechnungstyp können rigorose Unter- und Obergrenzen des Sicherheitsfaktors ( $FoS_{lower\ bound}$  bzw.  $FoS_{upper\ bound}$ ) berechnet und numerische Instabilitäten vermieden werden. Da *FELA* auf eine assoziierte Fließregel ( $\psi' = \varphi'$ ) beschränkt ist, empfahl Davis (1968) die Verwendung von reduzierten Festigkeitsparametern, um ein nicht-assoziertes Verhalten zu simulieren (sog. *Davis A*).

Analytische und numerische Standsicherheitsberechnungen an Beispielen aus der Praxis sowie homogenen Böschungen verdeutlichen, dass sich die Versagensmechanismen basierend auf dem Grenz-Gleichgewichtsverfahren (englisch Limit Equilibrium Analysis, *LEA*) und numerischen Analysen (*SRFEA*, *FELA*) unterscheiden können und andere Sicherheitsfaktoren aufweisen. In der gegenständlichen Kurzfassung werden die wichtigsten Zusammenhänge exemplarisch am Beispiel eines Polsterdamms beschrieben (siehe Abbildung 3).

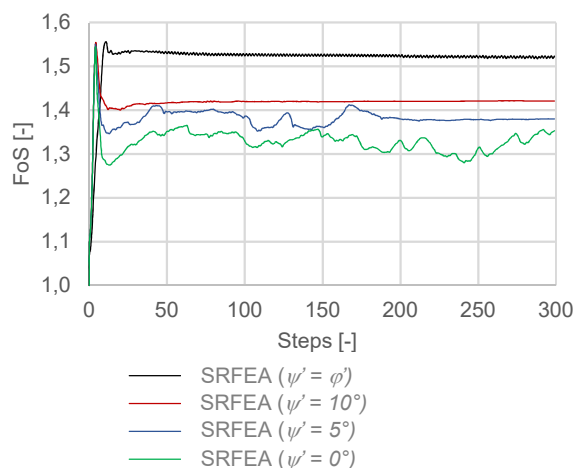


Abbildung 2. Standsicherheitsberechnungen (*SRFEA*) für verschiedene Dilatanzwinkel (Böschungsneigung  $45^\circ$ ,  $\varphi' = 45^\circ$ )

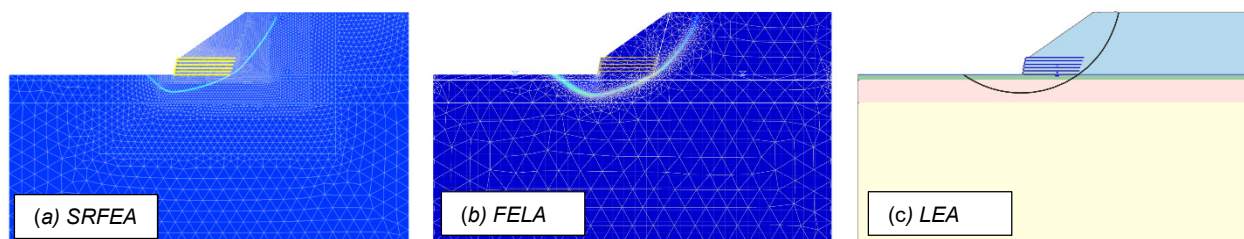


Abbildung 3. Beispiel Polsterdamm: Vergleich der Versagensmechanismen

Während die Versagensmechanismen und Sicherheitsfaktoren der *SRFEA* ( $\psi' = \varphi'$ ) und *FELA* ( $\psi' = \varphi'$ ) gut übereinstimmen, wird mittels dem Grenz-Gleichgewichtsverfahren (*LEA*) ein geringfügig abweichender Mechanismus und folglich ein höherer  $FoS = 1,72$  bestimmt (siehe Tabelle 1). Nicht assoziierte *SRFEA* ( $\psi' = 0^\circ$ ), welche das Verhalten des Bodens realistischer abbilden, führen wie oben beschrieben zu einem geringeren Sicherheitsfaktor ( $FoS = 1,55$ ).

Tabelle 1. Beispiel Polsterdamm: Übersicht der Sicherheitsfaktoren

	<i>LEA</i>	<i>SRFEA</i> (keine adaptive Netzverfeinerung, ~ 10.000 Elemente)		<i>FELA</i> (adaptive Netzverfeinerung, ~ 1.000 Elemente)			
		<i>Morgenstern &amp; Price</i>	$\psi' = \varphi'$	$\psi' = 0^\circ$	<i>Davis A</i>	<i>Davis B</i>	
$FoS$	1,72		1,66	1,55	1,66	1,35	1,49

Tabelle 2 verdeutlicht, dass *FELA* (*Davis A*) zu sehr konservativen Sicherheitsfaktoren führt. Der modifizierte Ansatz *Davis B*, welcher eine iterative Bestimmung des Sicherheitsfaktors erfordert, resultiert nach wie vor in einem konservativen Sicherheitsfaktor, zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung mit der *SRFEA* ( $\psi' = 0^\circ$ ).

Tabelle 2. Beispiel Polsterdamm: Gegenüberstellung von *Davis A* und *Davis B* mit *SRFEA* ( $\psi' = 0^\circ$ )

	% Differenz = 100 (FELA (Davis) - <i>SRFEA</i> ( $\psi' = 0^\circ$ )) / FELA (Davis)
<i>FELA</i> ( <i>Davis A</i> )	- 14,8
<i>FELA</i> ( <i>Davis B</i> )	- 4,0

Mit Hilfe weiterer Parameterstudien an homogenen Böschungen konnte verdeutlicht werden, dass ein Anstieg des Reibungswinkels  $\varphi'$ , der Kohäsion  $c'$  und des Maßes an nicht-Assoziativität  $\lambda$  ( $\lambda = \varphi' - \psi'$ ) zu größeren Differenzen zwischen *Davis A* und *SRFEA* führt. Dem gegenüber hat die Kohäsion  $c'$  für den modifizierten Ansatz *Davis B* einen geringeren Einfluss auf die Differenzen. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurden *FELA*, im Unterschied zu *SRFEA*, mit Hilfe einer adaptiven Netzverfeinerung ausgeführt. In diesem Zusammenhang erfolgt eine automatische Diskretisierung entlang des Versagensmechanismus, sprich in Bereichen plastischer volumetrischer bzw. deviatorischer Dehnungen. Numerische Studien bestätigen, dass unter deren Anwendung sowie einer reduzierten Elementanzahl das Sicherheitsniveau rigoros und zeiteffizient berechnet werden kann.

Standardmäßig bleibt der Dilatanzwinkel während *SRFEA* ( $\varphi'/c'$  Reduktion) unter Verwendung einer nicht-assozierten Fließregel ( $\psi' \neq \varphi'$ ) konstant bis der reduzierte Reibungswinkel dem Dilatanzwinkel entspricht. Anschließend werden beide Scherparameter gleichermaßen reduziert bis kein Systemgleichgewicht erzielt werden kann. Im Zuge der Masterarbeit wurden ergänzende Studien mit einem benutzerdefinierten Algorithmus durchgeführt, welcher eine Reduktion des Dilatanzwinkels  $\psi'$  von Beginn an berücksichtigt (siehe Formel [2]) und zu geringfügig kleineren Sicherheitsniveaus führt. Da letzterer Ansatz bodenmechanisch richtiger ist, wird dieser zukünftig auch seitens des Softwareherstellers PLAXIS verwendet werden.

In den meisten Fällen ist die Spannungssituation in situ unbekannt. Folglich ist die Auswirkung des ursprünglichen Spannungsniveaus auf den Sicherheitsfaktor von großem Interesse. Mit numerischen Studien konnte verdeutlicht werden, dass die initiale Spannungsverteilung in homogenen Böschungen keinen Einfluss auf den FoS nimmt. Unabhängig vom Ausgangspunkt des Spannungspfades wird dieser immer am selben Mohr-Coulomb Fehlerkriterium versagen (siehe Abbildung 4).

Abschließend ist festzuhalten, dass aufbauend auf der gegenständlichen Masterarbeit aktuell und zukünftig am Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik der TU Graz unter Betreuung von Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Tschuchnigg und Herrn Dipl.-Ing. Simon Oberhollenzer BSc. weitere wissenschaftliche Arbeiten zu diesem Thema verfasst werden.

### Wichtige Erkenntnisse für die Praxis

Es lassen sich die folgenden für die Praxis relevanten Erkenntnisse zusammenfassen:

- (1) Unter Verwendung der analytischen Grenz-Gleichgewichtsverfahren z.B. nach Bishop, Janbu oder Morgenstern & Price wird die Standsicherheit von Böschungen mit einer Neigung  $> 35^\circ$  deutlich überschätzt. In diesem Zusammenhang nimmt mit zunehmender Böschungsneigung und Kohäsion sowie abnehmendem Reibungswinkel die Überschätzung zu.
- (2) Standsicherheitsberechnungen basierend auf der Strength Reduction Finite Element Analysis SRFEA (z.B. Software PLAXIS) erlauben bei hohen Böschungsneigungen  $> 40^\circ$  und großen

$$FoS = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi'_{mob.}} = \frac{\tan \psi'}{\tan \psi'_{mob.}} = \frac{c'}{c'_{mob.}} \quad [2]$$

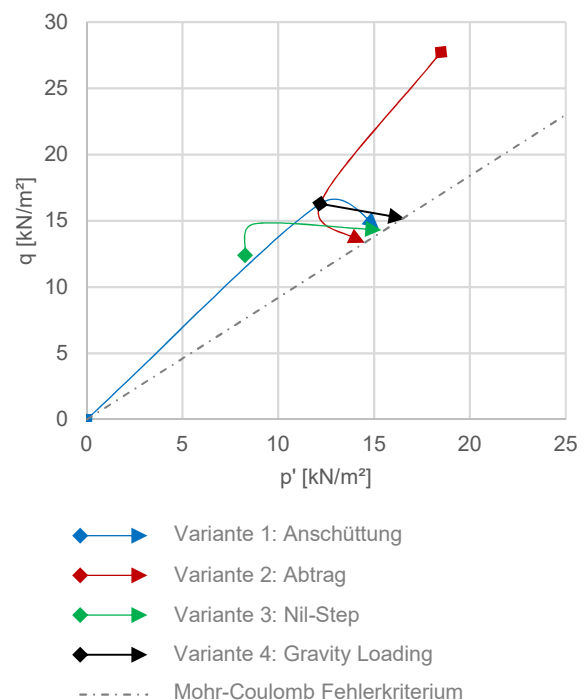


Abbildung 4. Spannungspfade für unterschiedliche Herstellungsprozesse

Reibungswinkel  $\varphi' > 35^\circ$  aufgrund numerischer Instabilitäten keine genaue Definition des Sicherheitsfaktors für moderaten Dilatanzwinkel.

- (3) Die Verwendung des modifizierten Ansatzes nach Davis (Davis B) ist in der Praxis nicht auf *FELA* (Finite Element Limit Analysis) beschränkt. Um die Standsicherheit unter Punkt (1) angeführten Bedingungen nicht zu überschätzen, werden Berechnungen basierend auf reduzierten Scherparameter empfohlen. Unter den in Punkt (2) angeführten Randbedingungen ermöglicht Davis B die Definition rigoroser Sicherheitsfaktoren durch *SRFEA* (Strength Reduction Finite Element Analysis).
- (4) Numerische Berechnungen finden im Zuge erdstatischer Nachrechnungen von bewährten Hanganschnitten (z.B. Ankerwände, rückverankerte Brückenwiderlager usw.) in der Praxis vermehrt Anwendung. Die Masterarbeit zeigt, dass der initiale Spannungszustand keinen Einfluss auf die Standsicherheit homogener Böschungen nimmt.

## Publikationen

Teile der Masterarbeit „Numerical studies on slope stability analysis“ wurden im Zuge der 15th IACMAG (International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 19-23 Oktober 2017) und der 14th DECGE (Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 07-09 Juni 2018) einem internationalen Fachpublikum präsentiert sowie in Konferenzbänden publiziert. Weiters konnte Simon Oberhollenzer die Ergebnisse seiner Abschlussarbeit im Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (JRMGE – Ausgabe November 2018) veröffentlichen. Folgend sind die entstandenen Publikationen stichpunktartig angeführt:

- Oberhollenzer S., Tschuchnigg F., Schweiger H.F. (2018). *Finite element analyses of slope stability problems using non-associated plasticity*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (JRMGE), Volume 10 (Issue 6), November 2018.
- Tschuchnigg F., Oberhollenzer S., Schweiger H.F. (2018). *Slope stability analyses considering non-associated plasticity application to boundary value problem*. Beiträge zu 14th DECGE - Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 07-09 Juni 2018, Skopje, Mazedonien.
- Tschuchnigg F.; Oberhollenzer S.; Schweiger H.F. (2017). *Comparison of standard and user-defined strength reduction techniques with finite element limit analysis*. Beiträge zu 15th IACMAG - International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 19-23 Oktober 2017, Wuhan, China.

## Kurzvorstellung Simon Oberhollenzer

Simon Oberhollenzer, geboren am 09. Mai 1992 in Bozen (Italien), maturierte am naturwissenschaftlichen Gymnasium J.P. Fallmerayer in Brixen und studierte Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz mit Vertiefung Geotechnik und Wasserbau. Ein Auslandsaufenthalt an der University of Calgary, diverse Praktika in Deutschland und Italien und eine Anstellung als studentischer Mitarbeiter am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft (TU Graz) begleiteten seine Ausbildungslaufbahn.

Nach Studienabschluss konnte Herr Oberhollenzer durch eine Anstellung bei der GDP ZT GmbH sein gewonnenes Wissen in der Praxis einsetzen sowie wertvolle Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung und Erarbeitung geotechnischer Fragestellungen sammeln, insbesondere bei erdstatischen Nachrechnungen von Ankerwänden und Brückenobjekten, Böschungsstabilitäts- sowie Setzungsberechnungen. Eine wiederkehrende Problematik bildet hierbei die Definition der Inputparameter. Die erheblichen Schwankungsbreiten diverser in der Literatur veröffentlichter Korrelationen zwischen den in-situ Erkundungsmethoden und den Eingangsgrößen verschiedener Materialmodelle weckte sein Interesse, welchem er sich im Zuge der aktuellen Anstellung als Universitätsassistent am Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik der TU Graz widmet.