

Anwendungsbeispiele für die Methode der dehnungsabhängigen Standsicherheit

Examples of application for the strain-dependent slope stability

Sebastian Ullmann

Einleitung

Um die Standsicherheit von Hängen und Böschungen zu gewährleisten, beschäftigen sich Wissenschaftler und Ingenieure bereits seit Jahrzehnten mit der Entwicklung von geeigneten Verfahren, die das Hang- und Böschungsversagen untersuchen und vermeiden sollen. Diesbezüglich wird am Institut für Geotechnik der TU-Dresden seit einiger Zeit an einem neuen Verfahren, der sog. Methode der dehnungsabhängigen Standsicherheit, geforscht. Diese Arbeit beschäftigt sich ebenfalls mit diesem Verfahren und zielt darauf ab, einen Beitrag zu dessen Etablierung in die Praxis zu leisten.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der numerischen Nachrechnung und der Anwendung der Methode der dehnungsabhängigen Standsicherheit auf das, im Jahr 1987 durchgeführte, Selborne Experiment, bei dem eine Böschung kontrolliert, durch die Erzeugung von Porenwasserüberdrücken im Böschungsinneren, zum Versagen geführt wurde.

Vorbereitend auf die numerischen Berechnungen wird zunächst die Methode der dehnungsabhängigen Standsicherheit und das, der Berechnung zugrunde gelegte, Stoffmodell eingeführt.

Methode der dehnungsabhängigen Standsicherheit

Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist zunächst die Kenntnis des Anfangsspannungszustands in der Böschung. Dieser kann händisch mithilfe des Lamellenverfahrens oder numerisch mit einer FE-Berechnung bestimmt werden.

Berechnungsablauf

Im ersten Berechnungsschritt des Verfahrens erfolgt die Festlegung einer zu untersuchenden Gleitfläche mit anschließender Diskretisierung in mehrere Knoten, siehe Abb. 1. In diesen Knoten wird der zuvor bestimmte Spannungszustand, bestehend aus vertikalen und horizontalen Spannungen sowie Scherspannungen abgegriffen und entsprechend der Gleitflächenneigung transformiert.

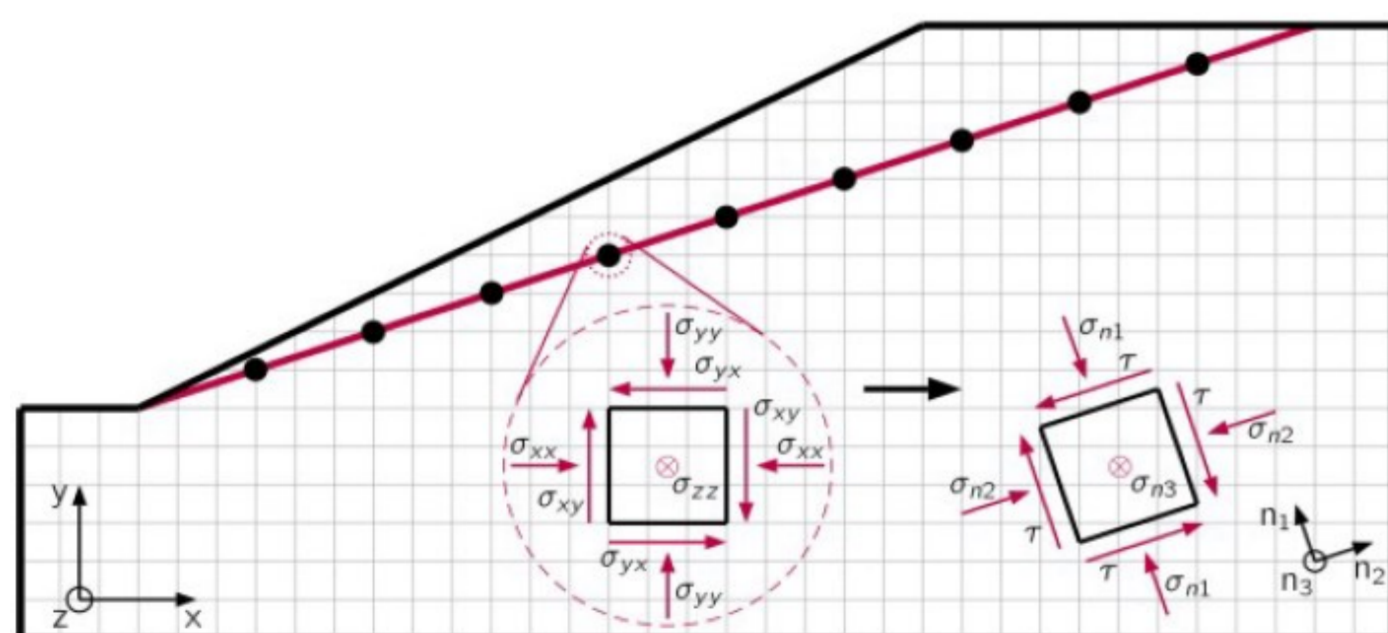


Abb. 1: Wahl und Diskretisierung einer Gleitfläche, sowie Transformation des Spannungszustands in den Knoten entsprechend der Gleitflächenneigung.

Im nächsten Berechnungsschritt erfolgt die Übergabe der transformierten Spannungen zu einer Routine zur Durchführung numerischer Einzelscherversuche. Für jeden Knoten wird dabei ein eigener Scherversuch simuliert, der das Scherspannungs-Dehnungs-Verhalten des Bodens an exakt diesem Punkt in der Böschung abbildet.

Unter der Annahme eines starren Blockgleitmechanismus, d.h. alle Knoten erfahren die gleiche Scherdehnung kann schließlich die Auswertung des Sicherheitsbeiwerts mithilfe von Gl. 1 erfolgen. Dazu wird der Scherspannungsverlauf aller Knoten i aufsummiert ($\sum \tau_{mob,i}$) und durch die Summe aller Anfangsscherspannungen ($\sum \tau_{0,i}$) dividiert.

$$\tau(\gamma) = \frac{\sum \tau_{mob,i}}{\sum \tau_{0,i}} \quad (1)$$

Durch die Analyse des hieraus resultierenden Scherspannungsverlaufs $\tau(\gamma)$ kann der Sicherheitsbeiwert F in Abhängigkeit der Scherdehnung γ anschließend direkt abgelesen werden, siehe Abb. 2.

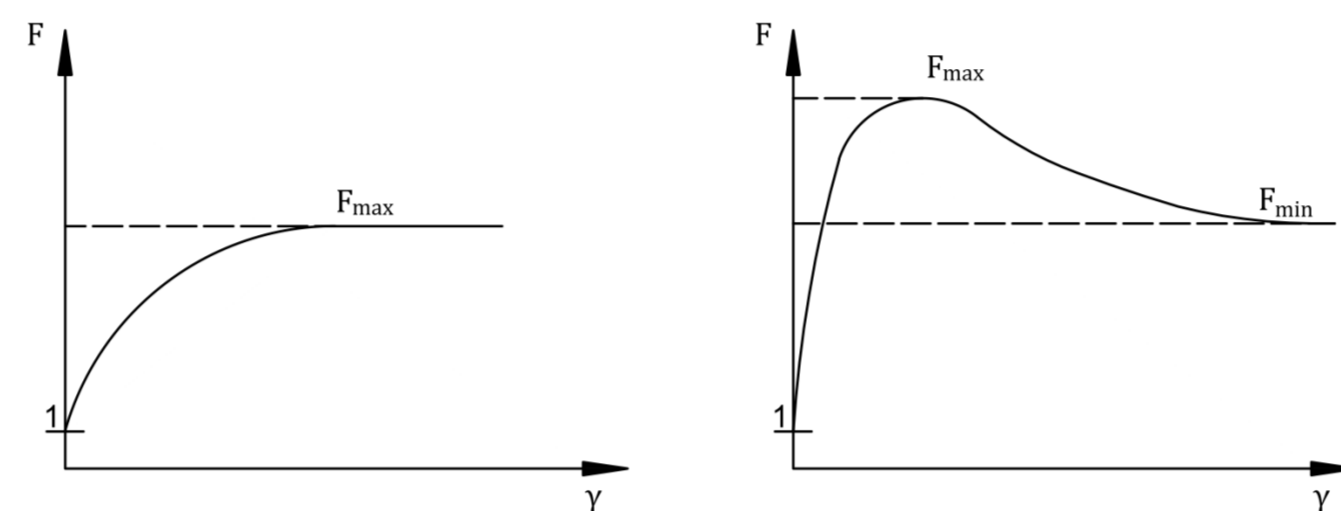


Abb. 2: Resultierender Scherspannungsverlauf $\tau(\gamma)$ mit Auswertung des Sicherheitsbeiwerts F . Links eines locker gelagerten Bodens, rechts eines dicht gelagerten Bodens mit Entfestigungsverhalten.

Vorteile des Verfahrens

Bedingt durch verschiedenste Einflussfaktoren wie z.B.: Lagerungsdichte, Inhomogenitäten, Überkonsolidierung oder Grundwasserverhältnisse kann es innerhalb einer Böschung zu einer unterschiedlichen Mobilisierung der Scherfestigkeit des Bodens kommen. Die Methode der dehnungsabhängigen Standsicherheit erlaubt es, durch die Durchführung von numerischen Scherversuchen, das realitätsnahe Scherverhalten des Bodens in der Sicherheitsbetrachtung der Böschung zu berücksichtigen. Des Weiteren ist das Verfahren nicht auf ein spezielles Stoffmodell beschränkt, sondern kann mit einer Vielzahl von Stoffmodellen angewendet werden. Dadurch kann sich das realitätsnahe Bodenverhalten bei geeigneter Wahl eines Stoffmodell auch wirklich in der numerischen Berechnung widerspiegeln. Außerdem stellt das Verfahren keinerlei Anforderung an die Gestalt der gewählten Gleitfläche, sodass u.a. kreisförmige, geradlinige oder zusammengesetzte Geometrien auf ihre Standsicherheit untersucht werden können.

Das Selborne Experiment

Das Selborne Experiment wurde in den Jahren 1987-1989 auf dem Gelände einer Tongrube in Selborne, Hampshire in England durchgeführt. Gegenstand des Experiments war eine ca. 9 m hohe Aushubböschung, die durch die Erzeugung von Porenwasserüberdrücken kontrolliert zum Versagen gebracht wurde. Das Ziel war es hierbei die Versagensmechanismen beim Böschungsbruch besser zu verstehen und untersuchen zu können. Aus diesem Grund wurde die Böschung mit einer Vielzahl von Messtechnik versehen, um kontinuierlich Verformungen, Porenwasserdrücke und schließlich auch die kritische Gleitfläche während des Versagens der Böschung zu messen, siehe Abb. 3.

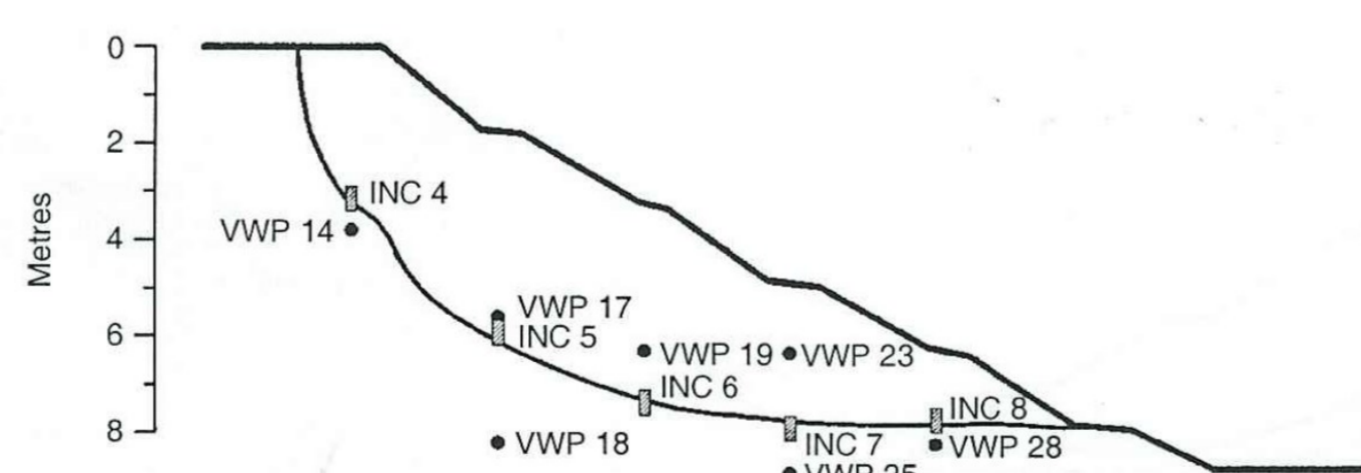


Abb. 3: Beobachtete Gleitfläche nach Eintritt des Versagens im Selborne Experiment mit umliegender Messtechnik (Inklinometer und Piezometer)

Numerische Nachrechnung

Für die numerische Nachrechnung des Selborne Experiments wurde das Modified-Cam-Clay Stoffmodell verwendet. Hierfür war es zunächst nötig, die fünf Stoffparameter des Modells M , λ , κ , v und N anhand der zur Verfügung stehenden Literaturdaten zu bestimmen. Da infolge des Experiments nur der Reibungswinkel und der Wassergehalt des Bodens im Labor ermittelt wurde, musste die Bestimmung der Stoffparameter größtenteils durch Annahmen und Korrelationen erfolgen. So wurde beispielsweise der benötigte Kompressions- und Schwellbeiwert C_c und C_s durch eine Korrelation zur Plastizitätszahl abgeschätzt.

Mit den so bestimmten Stoffparameter konnte im nächsten Schritt ein FE-Modell der Selborne Böschung erstellt werden, mit dessen Hilfe die Spannungszustände im Laufe der Porendruckerzeugung berechnet wurden.

Dehnungsabhängige Standsicherheit

Mit diesen Spannungszuständen erfolgte schließlich die Standsicherheitsbetrachtung der Selborne Böschung. Hierfür wurde eine Gleitfläche gewählt, die sich an der tatsächlichen beobachteten Gleitfläche im realen Experiment orientierte, siehe Abb. 3. Diese wurde für die Anwendung des Verfahrens in sechs Knoten diskretisiert. Nach der Durchführung der numerischen Einzelscherversuche erfolgte die Auswertung der Standsicherheit nach Gl. 1. Abb. 4 zeigt beispielhaft den hieraus resultierenden Scherspannungsverlauf vor der Erzeugung der Porenwasserdrücke im Böschungsinneren. Aufgrund des überkonsolidierten Bodens konnte hierbei eine stark ausgeprägte Entfestigung im Scherverhalten beobachtet werden, weshalb sich ein minimaler und ein maximaler Sicherheitsbeiwert F einstellte.

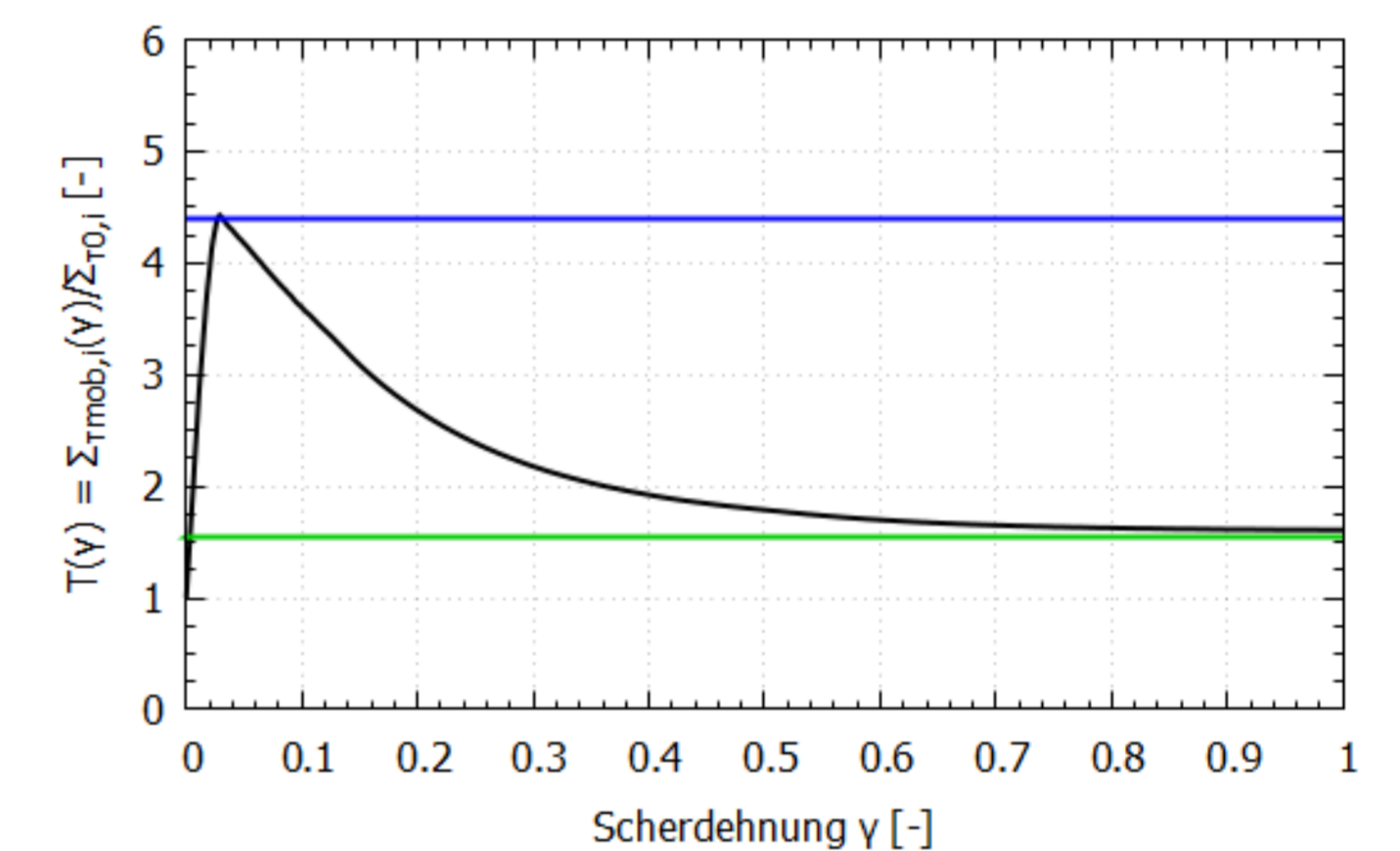


Abb. 4: Auswertung der Standsicherheit der Selborne Böschung vor Erzeugung der Porenwasserüberdrücke ($F_{max}=4,40$; $F_{min}=1,55$)

Zusammenfassung

Neben der Nachrechnung des Selborne Experiments war auch das fiktive Beispiel einer Aufschüttung auf einen weichen Tonuntergrund Gegenstand der Arbeit. Anhand dieser beiden Beispiele konnte das generelle Vorgehen bei der Anwendung der dehnungsabhängigen Standsicherheit ausführlich dargestellt werden. Beiden Beispielen wurde dabei das Modified-Cam-Clay Stoffmodell zugrunde gelegt.

Bei der undrainierten Standsicherheitsuntersuchung infolge der Porendruckerhöhung im Selborne Experiment stellte sich allerdings heraus, dass das Modified-Cam-Clay Stoffmodell zur Nachrechnung eines undrainierten überkonsolidierten Bodens ungeeignet war. Der Versagensmechanismus im realen Experiment war vor allem durch eine Entfestigung des Scherwiderstands des Bodens geprägt. Dies konnte jedoch bei der Durchführung der undrainierten numerischen Einzelscherversuche nicht reproduziert werden.

An dieser Stelle empfiehlt es sich eine weiterführende Untersuchung zur numerischen Nachrechnung des Selborne Experiments durchzuführen. Dabei sollte vor allem ein Vergleich verschiedener Stoffmodelle und deren Modellantworten vorangestellt werden.

Projekt

Diplomarbeit

Hochschullehrer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, TU Dresden

Wissenschaftliche Betreuung

Dr.-Ing. Kornelia Nitzsche, TU Dresden

Abgabe

Januar 2022