Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 139 (2013)
Heft: 31-32: Achtung Naturgefahr!

Artikel: Warum Hänge rutschen
Autor: Bommer, Christian / Schneider, Hansruedi
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-349275

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

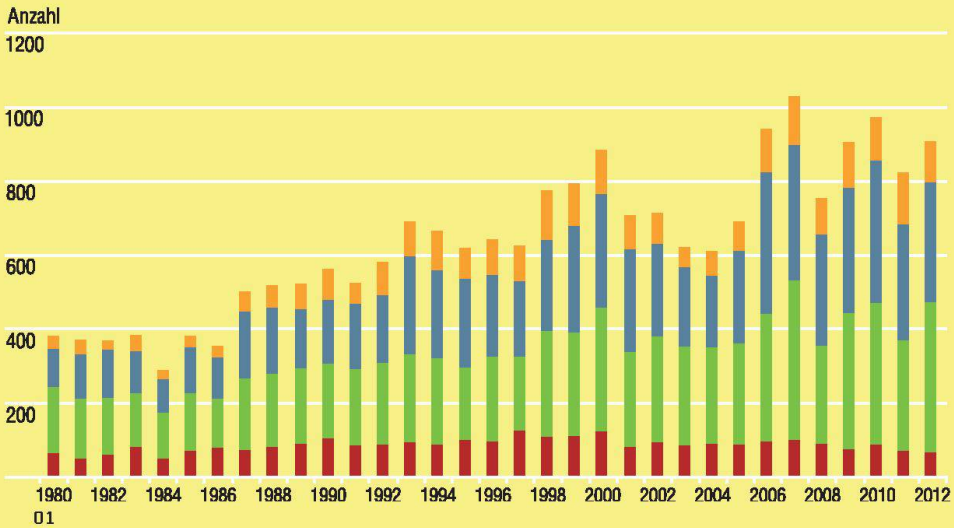
WARUM HÄNGE RUTSCHEN

Hangrutschungen nach Niederschlägen verursachen immer öfter grosse Schäden. Bisher als stabil geltende Hänge werden zu potenziellen Gefahren. Entscheidend für die Mobilisierung von Erdmassen ist die Verteilung des Wassers im Boden. Forscher an der HSR Rapperswil untersuchen das Verhalten von gefährdeten Hängen unter anderem mit einem Labormodell für die physikalische Simulation von Rutschereignissen. Damit soll die örtliche und zeitliche Stabilität von Hängen zuverlässig beurteilt werden können.

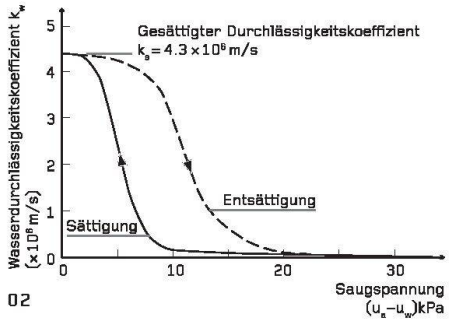
Durch Regen ausgelöste Hangrutschungen von natürlichen und künstlichen Böschungen gehören weltweit zu den häufigsten und destruktivsten Naturkatastrophen (Abb. 01). Insbesondere in dicht besiedelten, hoch entwickelten Ländern wie der Schweiz gefährden Rutschungen die allgemeine Sicherheit und haben jedes Jahr erhebliche Schäden und Sanierungskosten zur Folge. Die prognostizierte weltweite Klimaveränderung wird das Gefährdungspotenzial der Rutschungen weiter erhöhen, denn mehr Wetterextreme wie Trockenperioden und Starkniederschläge lassen Hänge, die bisher stabil waren, instabil werden. Klimatisch verursachte Rutschungen lassen sich mit den klassischen bodenmechanischen Methoden kaum prognostizieren, denn die klassische Bodenmechanik wurde für die beiden Grenzbedingungen «trockene Böden» oder «wassergesättigte Böden» entwickelt. In trockenen Böden sind die Bodenporen mit Luft unter atmosphärischem Druck gefüllt, in vollständig wassergesättigten Böden existiert ein positiver Porenwasserdruck. In natürlichen Hängen sind die oberen Bodenschichten jedoch meistens weder ganz trocken noch existiert ein Grundwasserspiegel mit vollständig wassergesättigten Poren. Stattdessen sind die Hänge nur teilweise mit Wasser gesättigt, sodass ihr physikalisches Verhalten und insbesondere ihre Stabilität nur mit den Mitteln der ungesättigten Bodenmechanik beschrieben und verstanden werden kann.

DIE DURCHLÄSSIGKEIT UNGESÄTTIGTER BÖDEN

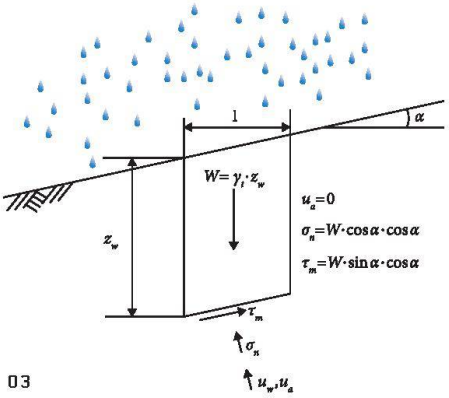
Anfangs des 20. Jahrhunderts wurde die physikalische Analogie zwischen dem kapillaren Aufsteigen von Wasser in dünnen Röhren und dem Verhalten von Kapillarwasser im Boden aufgezeigt. Die Forscher erkannten auch, dass partiell wassergefüllte Poren den Zusammenhalt des Bodens verbessern; das Phänomen wurde «scheinbare Kohäsion» genannt.



01 Weltweite Anzahl von Naturkatastrophen 1980–2012.[1]
■ Geophysikalische Ereignisse (Erdbeben, Tsunami, Vulkanausbruch)
■ Meteorologische Ereignisse (Sturm)
■ Hydrologische Ereignisse (Überflutung, Erdbewegung/Hangrutschung)
■ Klimatologische Ereignisse (Temperaturextrem, Trockenheit, Waldbrand)
(Grafik: Munich Re)



02



03

02 Typische Hysterese der Durchlässigkeitsfunktion in Abhängigkeit von der Saugspannung. (Grafiken: IBU HSR/Red.)
03 Schematische Darstellung der Modellvorstellung einer regeninduzierten, infiniten Hangrutschung.
α: Hangneigung (°)
W: Gewicht des betrachteten Bodenelements (kN/m²)
γ_t: Feuchtraumgewicht total (kN/m³)
z_w: Höhe des betrachteten Bodenelements (m)
σ_n: Normalspannung auf die Gleitfläche (kN/m²)
τ_m: Mobilisierte Scherspannung in der Gleitfläche (kN/m²)
u_w: Porenwasserspannung (kN/m²)
u_a: atmosphärischer Luftdruck (kN/m²)
04 Hangrutschmodell am Institut für Bau und Umwelt der Hochschule für Technik Rapperswil HSR. Ausgangssituation des Modellhangs vor Versuchsbeginn. (Fotos: IBU HSR)
05 Anfangsphase eines Versuchs am Hangrutschmodell: Durch Neigen der Anordnung und Beregnen wird der «Hang» instabil, erste Anrisse bilden sich im Boden an der Gleitfläche.
06 Hangrutschmodell bei Versuchsende: Der mobilisierbare Bereich des Bodens ist entlang der Gleitfläche abgerutscht. Wegen des Verlusts der scheinbaren Kohäsion und wegen des steigenden Grundwasserspiegels ist der ursprünglich kompakte Boden in Schollen zerfallen.

Die Durchlässigkeit für Wasser im ungesättigten Boden kann anhand eines wassergefüllten Kapillarrohrs erklärt werden: je kleiner der Radius, desto grösser die Steighöhe des Wassers und der negative Porenwasserdruck. Analog zum Radius der Kapillare ist im Boden die Porengrösse zu betrachten. Der Porenwasserdruck (u_w) wird relativ zum Luftdruck (u_a) als Saugspannung ($u_a - u_w$) angegeben.
Mit steigender Saugspannung sind nur noch die feinen Poren mit Wasser gefüllt, während die groben Poren Luft enthalten. Wasser fliesst jedoch nur durch jene Poren, die bereits mit Wasser gefüllt sind. Luftgefüllte Poren stellen hingegen Hindernisse für den Wasserfluss dar. In ungesättigten Böden ist die Durchlässigkeit deshalb keine Konstante, sondern eine Funktion der Saugspannung. Der Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Saugspannung ist mit zwei Umhüllenden (Hysterese) in Abb. 02 dargestellt. Die Sättigungskurve (links) geht von ganz trockenem Boden aus, der über die feinen Porensysteme gesättigt wird. Dabei werden die grossen Poren als Letzte mit Wasser gefüllt. Bei der Entsättigungskurve sind hingegen zu Beginn alle Poren mit Wasser gefüllt und trocknen im Lauf der Messung aus. Aus diesen unterschiedlichen Anfangsbedingungen können sich für eine gegebene Saugspannung unterschiedliche Wassergehalte und damit auch unterschiedliche Wasserdurchlässigkeiten innerhalb der Bandbreite zwischen den Kurven entwickeln.[2]

SAUGSPANNUNG UND SCHERFESTIGKEIT

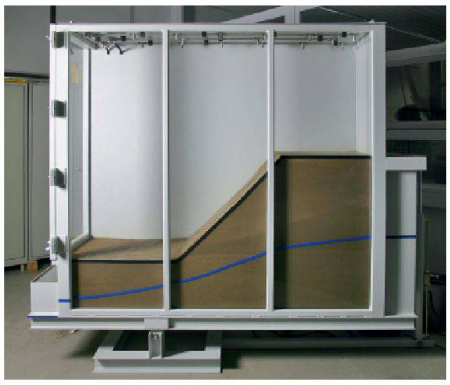
Die Saugspannungen beeinflussen nicht nur die Durchlässigkeit, sondern auch die Scherfestigkeit τ des Bodens. Mit steigenden Saugspannungen nimmt die scheinbare Kohäsion zu und erhöht die bei Belastungen mobilisierbare Scherfestigkeit. Diese stabilisierende Kohäsion wirkt jedoch nur, solange die Kapillarkräfte wirken. Klimatische Änderungen wie Verdunstung, Niederschläge oder Feuchtigkeitsschwankungen beeinflussen den Wasseranteil in den Bodenporen, was auch die scheinbare Kohäsion entsprechend ändert. Dieser Effekt wird in der herkömmlichen Bemessungspraxis nicht berücksichtigt, obwohl die Scherfestigkeit dadurch beträchtlich verändert werden kann. Wenn Niederschlagswasser in den Boden einsickert, wird die scheinbare Kohäsion verringert, dadurch wird auch die Scherfestigkeit reduziert. Aus diesem Grund werden steile Hänge häufig erst nach starkem Regen instabil. Die meisten regeninduzierten Hangrutschungen weisen eine nur wenige Meter unter der Geländeoberfläche liegende Gleitfläche auf, sodass die Hangrutschsicherheit mit einem oberflächennahen infiniten Modell wie in Abb. 03 gut abgeschätzt werden kann.
Der globale, traditionelle Sicherheitsfaktor F_S kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$F_S = \frac{\tan\phi'}{\tan\alpha} + \frac{1}{A}(c' + c_{Root} - u_w \cdot \tan\phi') \qquad \text{wobei } A = \gamma_t \cdot z_w \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

- Der erste Term der Formel, der Reibungsterm, ist im Boden immer vorhanden und hängt von der inneren Reibung ϕ' ab. Diese variiert je nach Boden und liegt typischerweise etwa zwischen 25° (Ton) und 40° (Kies), sandige Böden liegen dazwischen.
- Die Kohäsion c' des Bodens (zweiter Term) spielt für feinkörnige (Ton, Silt) und überkonsolidierte Böden eine Rolle. In sauberem Sand oder Kies ist keine Kohäsion c' vorhanden.
- Der dritte Term berücksichtigt, dass Vegetation und Wurzeln ebenfalls hangstabilisierend wirken können. Mechanisch betrachtet verstärkt die Wurzelkohäsion c_{Root} den Boden ähnlich wie ungespannte Anker. Sie kann wie ein Kohäsionsanteil behandelt werden und wirkt bis in eine Tiefe von ca. 0.5 m mit typischen Werten von ca. 3 kPa.[3]
- Der letzte Term der Formel bildet den Einfluss des Klimas, wie Regen oder Verdunstung, auf die Porenwasserdrücke u_w in einer vereinfachten Form ab. In Abhängigkeit der Lage der Gleitfläche des Hangrutsches und eines allfälligen Grundwasserspiegels (GWSp) können die Porenwasserdrücke den Sicherheitsfaktor beeinflussen (u_w ist positiv unter GWSp, darüber negativ).

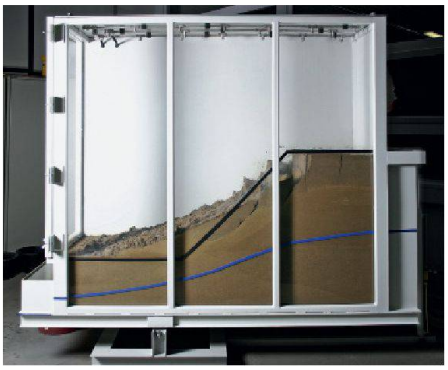
Die Porenwasserdrücke sind eine Funktion der Tiefe, der Zeit und der klimatischen Verhältnisse (Regen, Verdunstung). Der entsprechende Nachweis nach Swisscode SIA 267 (GZ Typ 3, $E_d \leq R_d$) kann wie folgt geführt werden:

$$E_d = \gamma_t \cdot z_w \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \;\leq\; R_d = \frac{c'}{1.5} + (\gamma_t \cdot z_w \cdot \cos^2\alpha - u_w) \cdot \frac{\tan\phi'}{1.2}$$



04

05



06

DAS HANGRUTSCHMODELL AN DER HSR

Von fundamentaler Bedeutung für die künftige Prognose – oder in einer späteren Phase vielleicht auch Verhinderung – von Hangrutschereignissen ist die baldige Umsetzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse der modernen ungesättigten Bodenmechanik in die Praxis. Eine Grundlage für das Verständnis dieser physikalischen Prozesse ist das Hangrutschmodell, das von der Fachstelle Geotechnik am Institut für Bau und Umwelt IBU der Hochschule für Technik Rapperswil HSR entwickelt wurde (Abb. 04–06). Damit sollen Hänge und Böschungen modelliert und ihr Stabilitätsverhalten untersucht werden – ähnlich wie bei hydraulischen oder aerodynamischen Untersuchungen an Modellen, die auch heute noch als nützliche und anerkannte Projektierungsinstrumente gelten.

Mit diesem neigbaren, 2.00 m langen, 0.60 m breiten und 1.80 m hohen Modell kann mittels Regenanlage (Nebeldüsen) an der Decke die Intensität und Dauer von Niederschlägen geregelt bzw. simuliert werden. Ausserdem können der Schichtenaufbau des Bodens berücksichtigt sowie der Grundwasserspiegel eingestellt und mit Piezometern überwacht werden. Zur Beobachtung und Überwachung bestehen zwei Seiten aus Acrylglas. Zusätzlich lassen sich die Änderungen des Porenwasserdrucks messen, die Änderungen des Wassergehalts im Boden erfassen und mit einem Waagensystem der Oberflächenabfluss und die Infiltration in die Böschung ermitteln. Alle Messinstrumente sind computerüberwacht und lassen sich via Monitor kontrollieren und regeln.[4]

Zusätzlich zur phänomenologischen Betrachtung im Modell müssen für die Beurteilung der Stabilität realer Hänge auch die vorherrschenden effektiven Spannungen im Boden bekannt sein. Diese lassen sich, korreliert mit weiteren Bodenparametern, aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Scherwellen in Bodenproben für verschiedene mechanische Spannungszustände ableiten. In der Fachstelle Geotechnik am IBU werden dafür Apparaturen verwendet, in denen zylindrische Bodenproben unter Druck untersucht werden (u.a. in sogenannten Fredlund-Zellen).

GENAUERE PROGNOSEN DANK MODELLEN UND SONDEN

Die Simulationen im Hangrutschmodell zeigen, dass neben einem allenfalls vorhandenen Grundwasserspiegel das Klima (Regen, Verdunstung etc.) einen wesentlichen Einfluss auf die Porenwasserdrücke in der ungesättigten Zone hat. Im physikalischen Modell wie auch in der Natur wurde beobachtet, dass Hangrutschungen nach Starkniederschlägen erst zeitverzögert auftreten. Im Extremfall können zwischen Regen- und Rutschereignis mehrere Tage liegen. Dies ist auf die Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Saugspannung in der ungesättigten Zone zurückzuführen (Abb. 02), sodass nicht nur ein Anstieg des Grundwasserspiegels, sondern auch der Rückgang der Saugspannung Zeit benötigt.

In der Praxis würde die Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit jederzeit eine realistische Beurteilung der Hangstabilität unter Berücksichtigung der ungesättigten Bodenmechanik und der wichtigsten Klimaeinflüsse ermöglichen. Dadurch entfällt die relativ aufwendige direkte Messung der Porenwasserspannungen. In Zukunft sollen neu entwickelte Erdsonden für automatisierte Feldmessungen die kontinuierliche In-situ-Überwachung potenziell gefährlicher Hänge ermöglichen. Die damit gewonnenen Erkenntnisse über die ungesättigte Zone werden, in Verbindung mit Informationen über vorhergegangene Regenereignisse sowie die geologische Entstehungsgeschichte, den Grundwasserspiegelverlauf, die Bodeneigenschaften und die geometrischen Rahmenbedingungen, zu genaueren Prognosen über den Zeitpunkt der Auslösung von Erdrutschen führen.

Christian Bommer, MSc Bau Ing., Stv. Leiter Fachstelle Geotechnik, Institut für Bau und Umwelt IBU, Hochschule für Technik Rapperswil HSR, cbommer@hsr.ch

Dr. Hansruedi Schneider, Prof., Leiter Fachstelle Geotechnik, Institut für Bau und Umwelt IBU, Hochschule für Technik Rapperswil HSR, hschneid@hsr.ch

Anmerkungen

1 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft Munich Re, GeoRisikoForschung, NatCatSERVICE, Stand Januar 2013.

2 Sogenannte «scanning curves», mit denen die Entwicklung des Wassergehalts für unterschiedliche Startbedingungen beschrieben wird, sind beispielsweise dokumentiert in: Lim T. T., Rahardjo H., Chang M. F. and Fredlund D.G., «Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope», Canadian Geotechnical Journal Vol. 33, 1996, pp. 618–628.

3 Vgl. beispielsweise: Wu T. H., 2013. «Root reinforcment of soil: review of analytical models, test results and applications to design», Canadian Geotechnical Journal Vol. 50, 2013, pp. 259–274.

4 Schnellmann R., Busslinger M., Schneider H.R. and Rahardjo H., «Effect of rising water table in an unsaturated slope», Engineering Geology Vol. 114, 2010, pp. 71–83.