Bodenmechanische Aspekte bei flachgründigen Rutschungen

Dr. Alexandru Marin

Danksagung

Diese Präsentation wurde durch die freundliche Unterstüzung von

Prof. Dr. Sarah M. Springman und **Prof. Dr. Ioannis Anastasopoulos** ermöglicht.

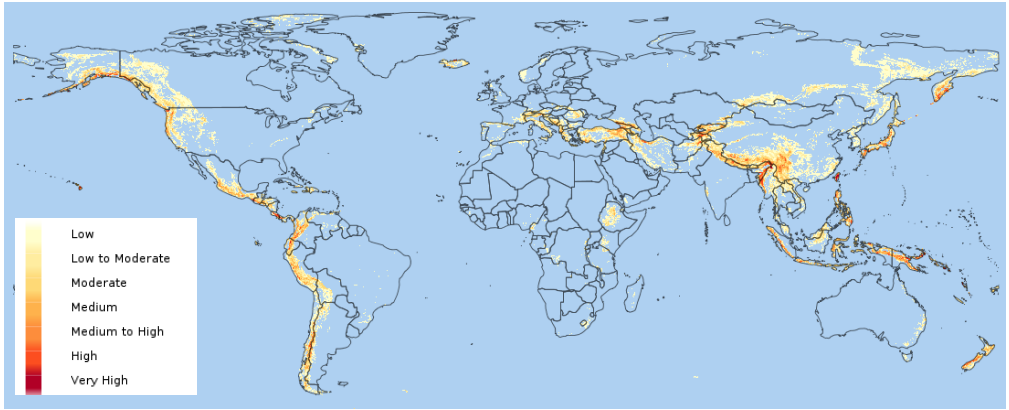
Inhalt

- **Globale und lokale Auswirkung**
- **Definition und Klassifikation von Rutschungen**
- **Auslöser und Einflussfaktoren**
- **Beurteilung der Stabilität**
- **Labor- und Felduntersuchungen**

(Askarinejad, 2013)

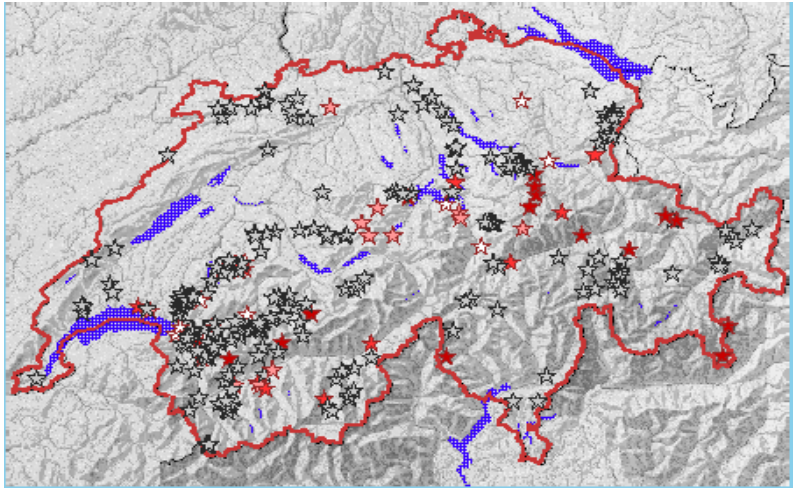
Globale und lokale Schadenwirkung

- Gefährdete Personen: ca. 300 Mio.
- Gefährdete Gebiete: 3.7 Mio. km^2
- Stark gefährdete Personen: 66 Mio.
- Hochrisikogebiete: 0.82 Mio. km^2



(Dilley et al., 2005)

- Gefährdete Gebiete: ca. 3000 km^2
- Ca. 6 – 8 % der Gesamtfläche



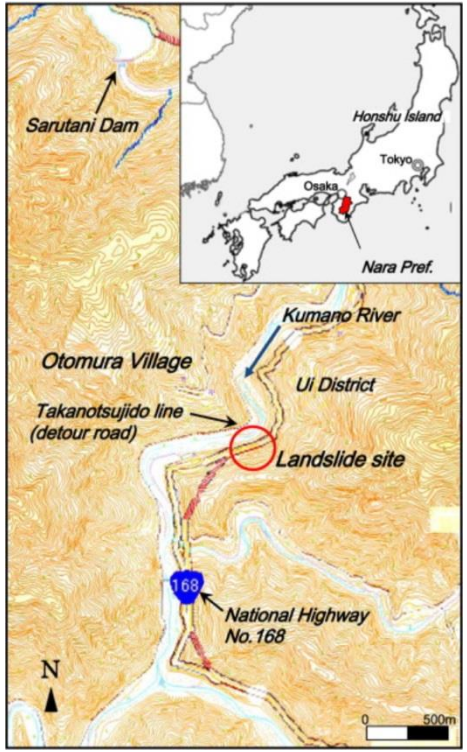
(BRP et al., 1997)

(Fujisawa et al., 2010)

Definition und Klassifikation

2004 - Otomura Japan

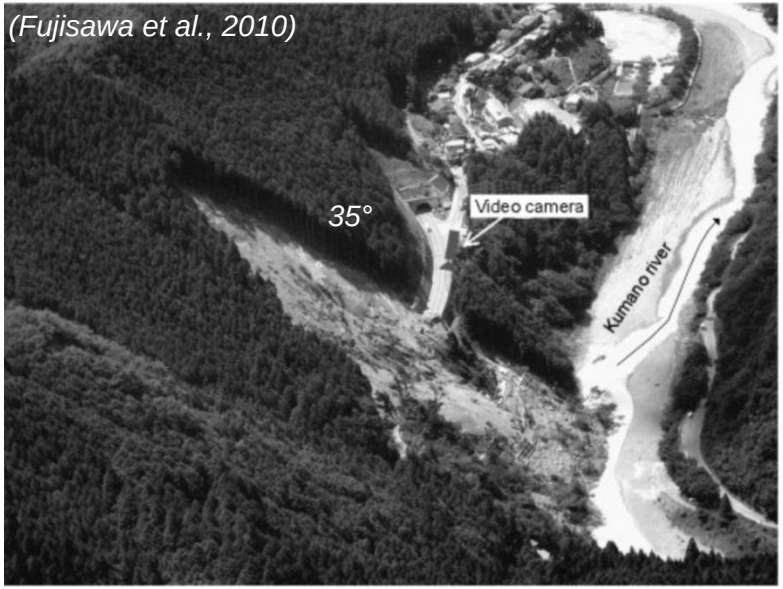
- **Taifune** durchqueren das Land.
- Ende Januar wurden **Risse an einer Stützmauer** entlang der Autobahn 168 (Nara-Bezirk) entdeckt.
- Ein **Beobachtungssystem** wurde für die Verkehrssicherheit aufgeschaltet.
- Anfangs Mai, trat eine **flachgründige Rutschung** oberhalb der Stützmauer auf und der Verkehr musste eingestellt werden.
- Ende Juni wurden **Abrisskanten und Querfalten** ca. 50 m oberhalb der Autobahn entdeckt.
- Das Beobachtungssystem wurde mit **zahlreichen Borhlöchern, Piezometern, Inklinometern, Extensometern und einer Kamera** ergänzt.
- Die Alarmwerte (z.B. v > 2mm/h während 2 Std.) wurden erreicht und am 10. August trat eine **massive Translationsrustchung** auf.



Definition und Klassifikation

2004 - Otomura Japan

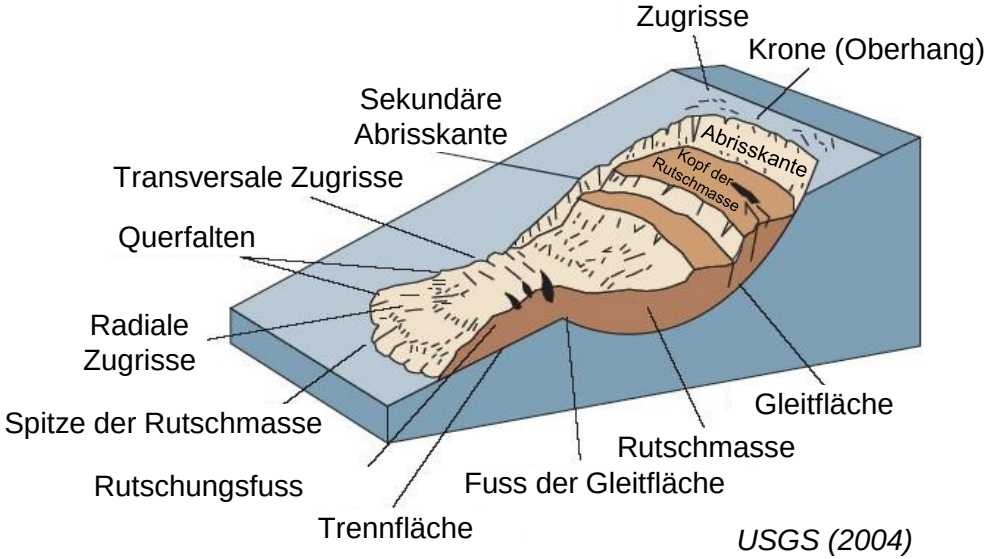
Otomura Landslide (2004), Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport



- Merkmale der Rutschung: t ≈ 15 - 30 m, v ≈ 12 m/s, F ≈ 55’000 m^2
- Auslösefaktor: Taifun-induzierte Erhöhung der Porenwasserdrücke

Definition und Klassifikation

Anatomie der Rutschungen



USGS (2004)

Hangmurren: Rutschmassen mit hohem Wassergehalt (z.B. $w \geq w_L$), welche mit hoher Geschwindigkeit (bis 30 km/h) hangabwärts auf die Trennfläche fliessen.

Definition und Klassifikation von Rutschungen

Klassifikation von Rutschungen (nach BAfU)

- Tiefe
  - oberflächennah 0 – 2 m
  - mitteltief 2 – 10 m
  - tief 10 – 30 m
  - sehr tief > 30 m
- Ausdehnung
  - klein 0 – 50 m^2
  - mittel 50 – 1’000 m^2
  - gross 1’000 – 50’000 m^2
  - sehr gross > 50’000 m^2

(Ministerio de Defensa del Peru)

(flickr.com/photos/arjuna)

Definition und Klassifikation von Rutschungen

Klassifikation von Rutschungen (nach BAfU)

- Mechanismus
  - Rotation/ Translation - lokalisierte Gleitfläche
  - Zerscherung - verteilte Scherbänder
  - Kriechen - innere Verformungen
- Geschwindigkeit
  - substabil 0 – 2 cm/Jahr
  - wenig aktiv 2 – 10 cm/Jahr
  - aktiv > 10 cm/Jahr

St. Moritz, GR

Beurteilung der Stabilität

Ansatz der unendlichen hangparallelen Gleitfläche

- Anwendbar für oberflächennahe Rutschungen mit langen und wenig mächtigen Rutschmassen.

- Treibend: Eigengewicht der Rutschmasse

$$T = G_0 \cdot \sin\alpha \qquad G_0 = \gamma \cdot z \cdot \Delta l \cdot \cos\alpha$$

- Rückhaltend: Reibungs- u. Haftkräfte an der Gleitfläche

$$R = G_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot \tan\varphi' + c' \cdot \Delta l \quad \text{(drainiertes Verhalten)}$$

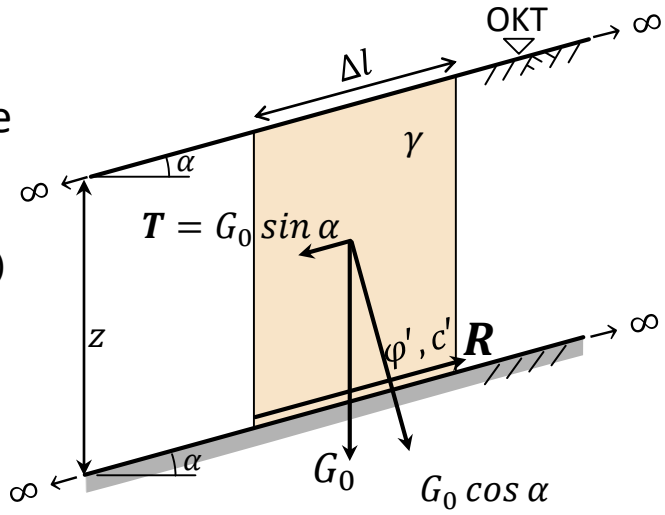
$$R = S_u \cdot \Delta l \quad \text{(undrainiertes Verhalten)}$$

- Globaler Sicherheitsfaktor aus Grenzgleichgewicht

$$\boldsymbol{SF} = \frac{\boldsymbol{R}}{\boldsymbol{T}} = \frac{\gamma \cdot z \cdot \cos^2\alpha \cdot \tan\varphi' + c'}{\gamma \cdot z \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha} \quad \text{oder} \quad \frac{S_u}{\gamma \cdot z \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}$$

c sehr hoch
φ' rel. klein

c sehr klein
φ' rel. hoch

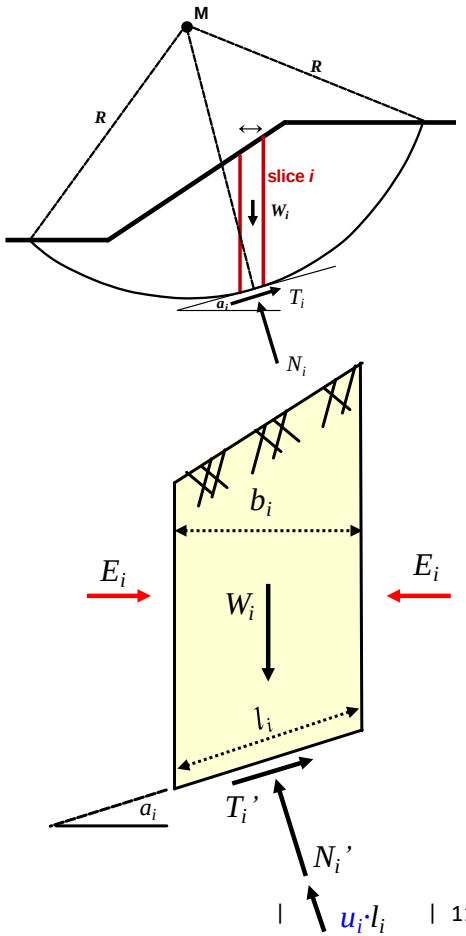


Beurteilung der Stabilität

Vereinfachter Ansatz von Bishop (gekrümmte Gleitfläche)

- Anwendbar für allgemeine Rutschungen
- Treibend: Eigengewicht der Rutschmasse W_i
- Rückhaltend: Reibungs- u. Haftkräfte an der Gleitfläche T_i
- Globaler Sicherheitsfaktor wird iterativ aus dem Momentengleichgewicht bestimmt:

$$SF = \frac{1}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum \left\{ \frac{\left[c \cdot b_i + W_i \left(1 - \frac{u \cdot b_i}{W_i} \right) \tan \varphi'_i \right] \cdot \sec \alpha_i}{1 + (\tan \alpha_i \cdot \tan \varphi'_i / SF)} \right\}$$



Beurteilung der Stabilität

Ansatz der Finite-Elemente-Methode (FEM)

	FEM	*Grenzgleichgewicht*
Hauptkonzept	• FE-Diskretisierung • Stoffgesetze	• Lamellendiskretisierung
Eingabe	• Geometrie • Bodenkennwerte fürs Stoffgesetz	• Vorgegebene Gleitflächen • Geometrie • Scherfestigkeit
Resultate	• Versagensmechanismus • Verteilung der Spannungen • Sicherheitsfaktor	• Kritische Gleitfläche • Sicherheitsfaktor
Vorteile	• Anwendbar für sehr komplexe Geometrien • Spannungs-Dehnungs-Analyse	• Einfache Grundlage • Zahlreiche erfolgreiche Fälle
Nachteile	• Fachwissen und Erfahrung nötig	• Keine Angabe über die Spannungsverteilung • Unsicherheit der Lage der Gleitflächen

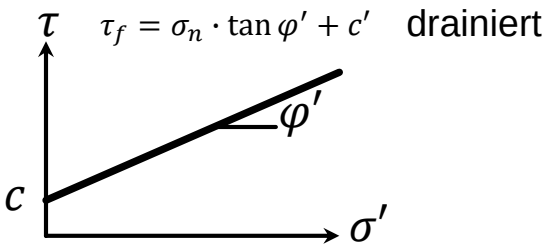
Auslöser und Einflussfaktoren

▪ Struktur und Art des Bodens	➢ Zusammensetzung, Schichtung
▪ Vegetation	➢ Laubdach, Wurzelwerk, Evapotranspiration
▪ Grundwasser und Niederschlag	➢ Saisonale Änderungen, Sättigung, Durchsickerung
▪ Erdbeben	➢ Trägheitseffekte, Wellenausbreitung, Änderung der Porenwasserdrücke
▪ Lage des Hanges	➢ Neigung, benachbarten Gewässer o. Infrastruktur
▪ Erosion	➢ Materialtransport in und am Fuss der Rutschmasse
▪ Geländeveränderungen	➢ Ent- oder Belastung der Rutschmasse

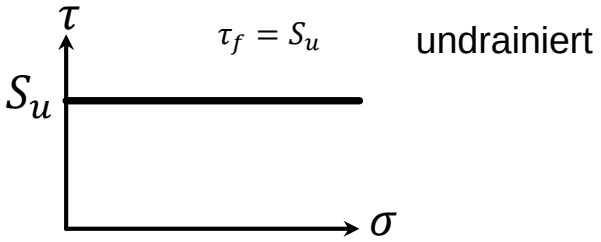
Auslöser und Einflussfaktoren

Struktur und Art des Bodens

- Drainierte und undrainierte Scherfestigkeit



- grobkörnige Böden
- genügende Durchlässigkeit
- relativ langsame Belastung



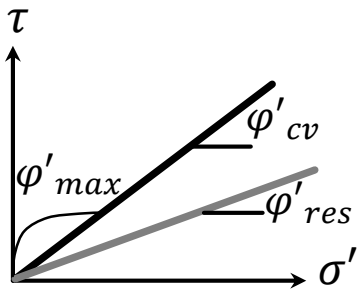
- feinkörnige Böden
- kleine Durchlässigkeit
- schnelle Belastung

- Die Reduktion der effektiven Spannungen (z.B. durch Porenwasser-überdrücke) führt zur Reduktion der Scherfestigkeit
- Unter schnellen Belastung verhält sich der Boden undrainiert und hat eine spannungsunabhängige Scherfestigkeit

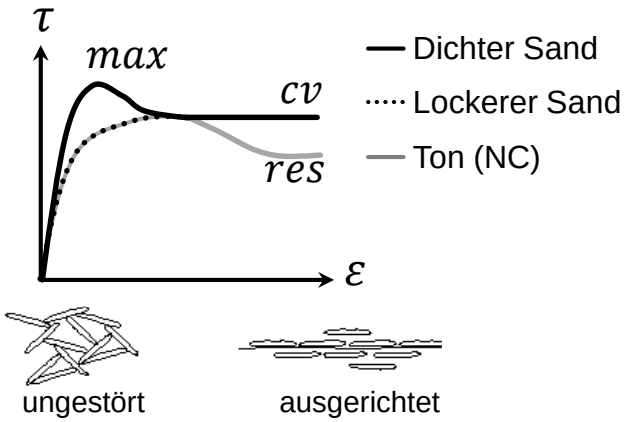
Auslöser und Einflussfaktoren

Struktur und Art des Bodens

- Spannungs- und dehnungsabhängige Scherfestigkeit



- φ'_{max} - Dilatanz
- φ'_{cv} - konstantes Volumen
- φ'_{res} - Partikelausrichtung



- Oberflächennahen Gleitflächen werden von niedrigen Spannungen und somit vom dilatanten Bodenverhalten geprägt.
- Bei grossen Verformungen entlang der Gleitfläche wird nur ein Bruchteil der maximalen Scherfestigkeit mobilisiert.

Auslöser und Einflussfaktoren

Vegetation

Positive Auswirkungen

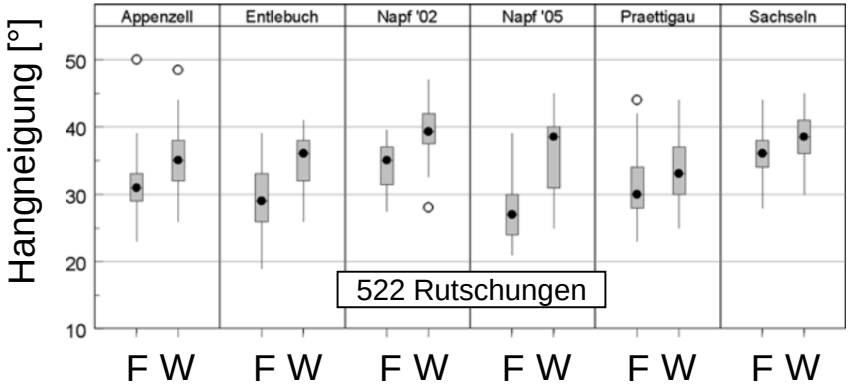
- **Saugspannungen** werden erhalten durch Interzeption des Niederschlags im Bereich vom Laubdach und erhöht durch Evapotranspiration des Wurzelwerks.
- **Zugspannungen** im Wurzelwerk-Boden System.

! Negative Auswirkungen (v.a. bei Flussdämme)

- Das Wurzelwerk kann **Sickerwege erhöhter Durchlässigkeit** im Boden bilden → Erosion.

F – Freiland
W – Wald

Rickli & Graf (2009)

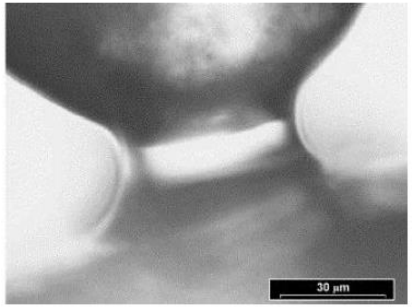


(DWA-M 507-1, 2011)

Auslöser und Einflussfaktoren

Grundwasser, Niederschlag und Schneeschmelze

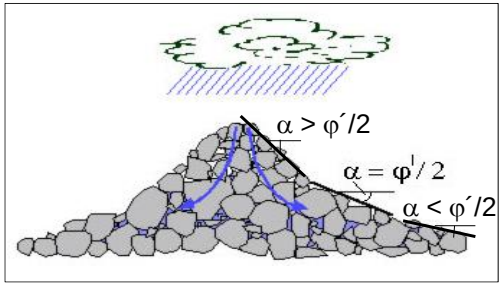
Van Mechelen (2004)



- Im natürlichen Zustand ist der Boden **teilgesättigt** (drei Phasen: Körner, Wasser, Luft).
- Durch die Oberflächenspannung entstehen im Wasser negative Drücke (**Saugspannungen**).
- Saugspannungen erhöhen die Scherfestigkeit des Bodens durch **scheinbare Kohäsion** $\boldsymbol{C} = c' + f(S_r)$

$$\tau_f = \sigma_n \cdot \tan\varphi' + \boldsymbol{C}$$ (nach Fredlund et al., 1978)

- Durch Wasserzufluss **nimmt** $\boldsymbol{S_r}$ zu, die Saugspannungen werden kleiner, $\boldsymbol{C}$ **nimmt ab** und $\boldsymbol{\tau_f}$ **reduziert** sich.

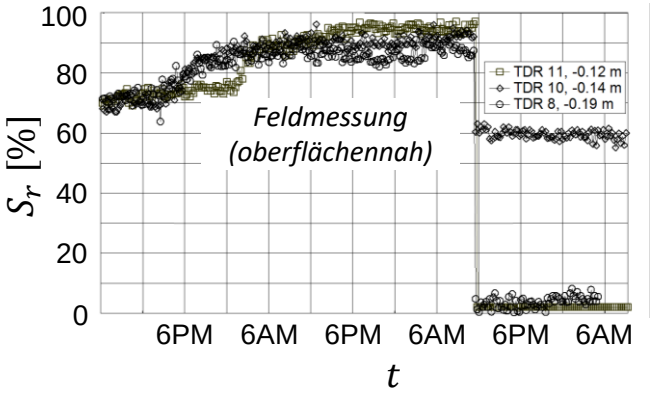


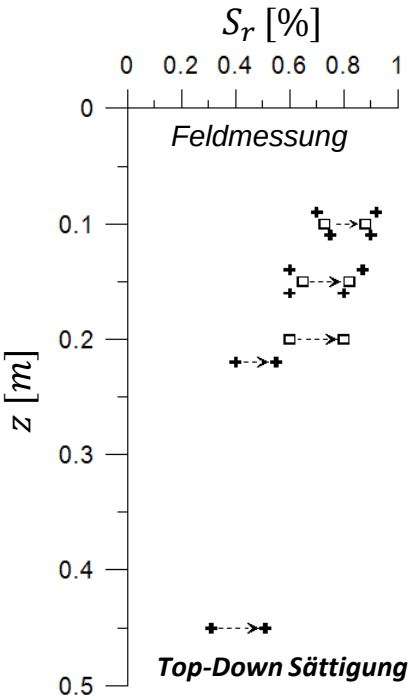
Springman (2013)

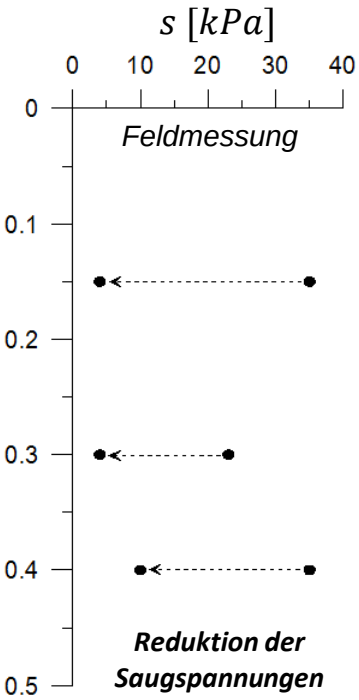
Auslöser und Einflussfaktoren

Springman et al. (2003)

Grundwasser, Niederschlag und Schneeschmelze







Gruben, VS

Auslöser und Einflussfaktoren

Grundwasser, Niederschlag und Schneeschmelze

Beurteilung des kritischen Zustands

$$\boldsymbol{SF} = \frac{\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi_{cv} + C}{\gamma \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} = \mathbf{1}$$ bei instabilem Hang

$$\boldsymbol{C_{crit}} = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 42 \cdot (\tan 42 - \tan 41) = 0 \ldots 0.5\ kPa$$

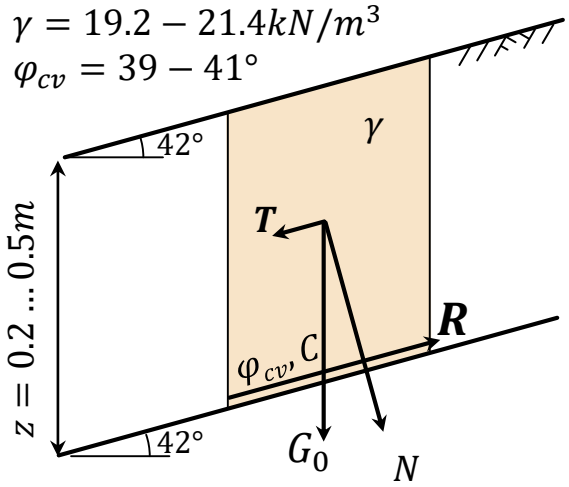
Feld- und Labormessungen

- Künstlicher Regen: $\boldsymbol{S_r}$ **steigt** von 60% bis 95%.
- Demzufolge **sinkt** $\boldsymbol{C = f(S_r)}$ von $4\ kPa$ bis $\sim 0.3\ kPa$.
- Dementsprechend **nimmt** $\boldsymbol{SF}$ bis ~ 1 (Versagen) ab.

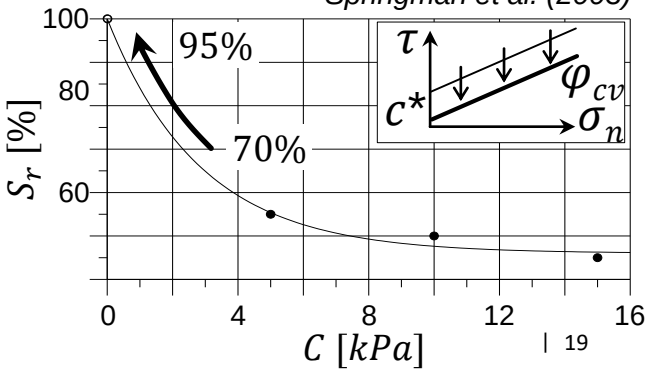
Gruben, VS

$\gamma = 19.2 - 21.4 kN/m^3$

$\varphi_{cv} = 39 - 41°$



Springman et al. (2003)



Auslöser und Einflussfaktoren

Erdbeben

Dubs & Habegger (2014)

2013 Bohol Erdbeben (M7.2) + Taifun

Sitar & Khazai (2001)

2001 El Salvador Erdbeben (M7.6)

Feld- und Laboruntersuchungen

Parameter zu untersuchen

- Bodenaufbau
- Wasserdrücke
- Meteodaten
- Verformungen

Feld

Totalstation

Piezometer

Tensio-meter

TDR

Meteo

Inklinometer

- Scherfestigkeit
- Steifigkeit
- Durchlässigkeit

Labor & Feld

Triax

Oedometer

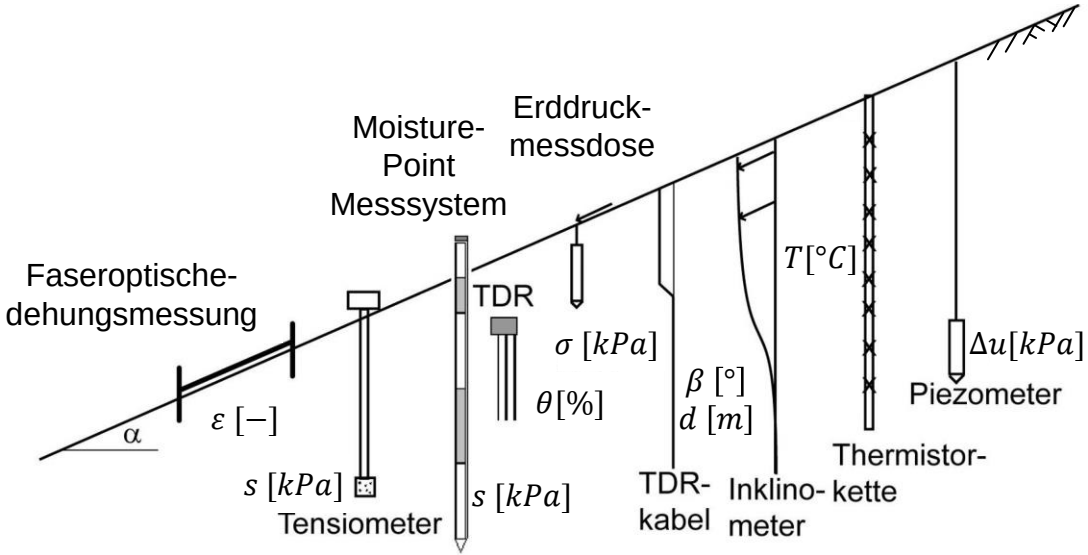
Direktscher (Labor)

Direktscher (Feld)

Feld- und Laboruntersuchungen

Feldsondierungen und Überwachungssysteme

- **Bodenaufbau**: Bohrsondierungen, Geophysikalische Messungen, Densiometer
- **Wasserdrücke, Verformungen, Meteodaten**: Feldbeobachtungssysteme



Zusätzlich
- Topographische Messsysteme
- Wetterstationen
- Akustische Messsysteme

Feld- und Laboruntersuchungen

Laboruntersuchungen (inkl. Versuche für in-situ Bodenkennziffern)

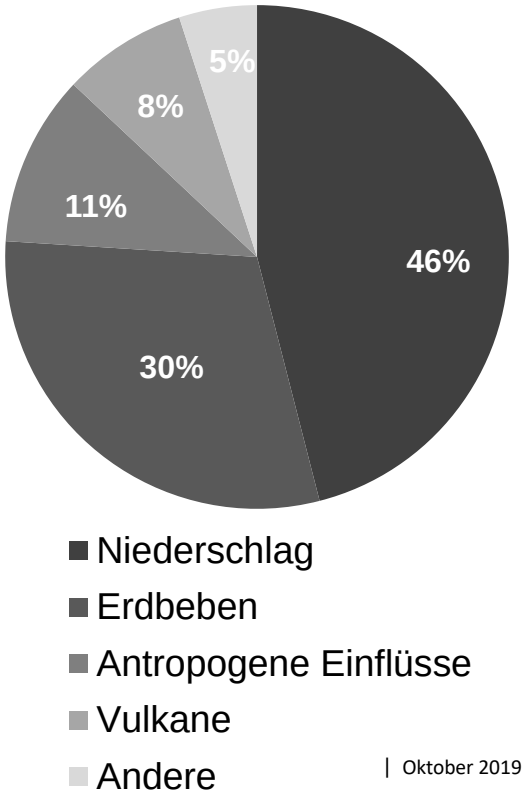
- **Scherfestigkeit**: Triaxial-, Direktscher-, Simple-Scherversuch, Flügelsondierung, Drucksondierung, In-situ Scherversuch
- **Steifigkeit:** Triaxial-, Oedometer-, Presiometerversuch, Drucksondierung
- **Durchlässigkeit:** Durchlässigkeitsversuch mit konstanter Druckhöhe, Pumpversuch

Fazit

- Rutschungen haben **schwerwiegende Auswirkungen** auf die Gesellschaft.
- Die **sehr verschieden Auslöse- und Einflussfaktoren** weisen auf die Komplexität von Rutschungen hin.
- Zu den wichtigsten Auslöser gehören **hydraulische Bedingungen, Seismizität und menschliche Tätigkeit.**
- Genaue Abschätzungen der Stabilität erfordern **mechanisch kompatible Ansätze**.
- **Labor- und Feldversuche** sind **zwingend erforderlich** für eine realistische Abschätzung der Hangstabilität.

(Mora, 2007)

Auslösefaktoren der Rutschungen in Südamerika & Karibik (1970-2006)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Referenzen

Askarinejad, A. (2013) Failure mechanisms in unsaturated silty sand slopes triggered by rainfall. ETH Diss. No. **21423**. ETH Zürich.

BRP, BWW & BUWAL (1997) Empfehlungen 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Reihe Naturgefahren. Bern.

Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M., Agwe J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B. & Yetman G. (2005) Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. World Bank, Washington, D.C.

Dubs, R. & Habegger, R. (2014). Multi-Hazard Analyses of Slopes using the Example of the Chocolate Hills. Projektarbeit am Insitut für Geotechnik, ETH Zurich.

DWA-M 507-1 (2011). Deiche an Fliessgewässern. Teil 1: Planung, Bau und Betrieb. Gemeinsames Blatt der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), des Deutschen TalsperrenKomitees (DTK), der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

Fujisawa, K., Marcato, G., Nomura, Y. & Pasuto, A. (2010) Management of a typhoon-induced landslide in Otomura (Japan). Geomorphology, **124(3-4)**: 150-156.

Kanton NW (2005) Hangmurren bei Oberrickenbach (NW). Kantonale Führungsstab Nidwalden.

Mora Castro, S. (2007). The nature of disasters: Reflections on their causes and consequences in Latin America and the Caribbean (LAC). In: Proceedings of 1st North American Landslide Conference, American Association of Environmental and Engineering Geologist, Vail Colorado.

Puzrin, A. & Sterba, I. (2006) Inverse stability analysis of the St. Moritz landslide. In: Hoe I. Ling et al. (eds.), Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis: 949–955. Springer, Netherlands.

Rickli, C., & Graf, F. (2009) Effects of forests on shallow landslides - case studies in Switzerland. Forest Snow and Landscape Research, **82(1):** 33-44.

Sitar N. & Khazai, B. (2001). Characteristics of Seismically Induced Landslides in Recent Earthquakes. In: Kuhne et al. (Eds), Proceedings of the Int. Conf. on Landslides: Causes, Impacts and Countermeasures, United Engineering Foundation, Inc: 227-237.

Springman, S.M. (2013). Skript zu Vorlesung Bodenmechanik. Insitut für Geotechnik, ETH Zürich.

Springman, S.M., Jommi, C. & Teysseire, P. (2003) Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history. Géotechnique, **53(1)**: 3-10.

USGS (2004) Landslide Types and Processes. Factsheet **2004-3072** of the US Geological Survey.

van Mechelen, J.L.M. (2004). Strength of moist sand controlled by surface tension for tectonic analogue modelling. Tectonophysics, **384(1-4)**: 275-284.