

# Böschungsstandsicherheit unter Einfluss von strömendem Wasser

(Safety of slope stability of influence of flowing water)

Vincent Nutschan

## Einleitung

Die Standsicherheit von Böschungen ist unabhängig, ob sie natürlich entstanden oder anthropogen erstellt worden sind, ein Kernthema der Geotechnik. Zu deren Berechnungen hinsichtlich Geometrie und Bodenbeschaffenheit existieren verschiedene Verfahren. Nur einige bieten die Möglichkeit Einflüsse aus strömendem Wasser beispielsweise durch Grundwasserspiegelschwankungen, Niederschläge oder durch das Befüllen oder Entleeren von Speicherbecken verursacht, in die Berechnung mit einfließen zu lassen. Im Rahmen der Projektarbeit wurde der Einfluss von strömendem Wasser auf die Standsicherheit anhand von Modellversuchen und deren Nachrechnung untersucht.

Beim verwendeten Versuchsboden handelt es sich um einen enggestuften Grobsand mit hoher Durchlässigkeit und einem kritischen Reibungswinkel von ca. 35°.

## Untersuchung der Sickerlinien

Zunächst wurden dazu im Versuchsstand HM169 des Herstellers GUNT verschiedene Böschungsgeometrien eingebaut und mithilfe von Fotos und CAD-Software die Lage der Sickerlinie in der Böschung bestimmt. Die Ergebnisse wurden mit den Berechnungsverfahren nach Pavlovsky und Casagrande verglichen. Durch den höheren Wasserspiegel links des Bodenkörpers bildet sich eine nach rechts abfallende Sickerlinie aus. Durch Zugabe des Tracers (gelber Farbstoff) wird dieser besser sichtbar (vgl. Abb. 1) und erleichtert somit die nachfolgende Auswertung der Bilder. Die Lage der Tracerspur wird im allgemeinen durch kapillares Saugen beeinflusst. Es ist daher davon auszugehen, dass der freie Wasserspiegel, also die tatsächliche Lage der Sickerlinie einige Zentimeter unterhalb der Tracerspur liegt.

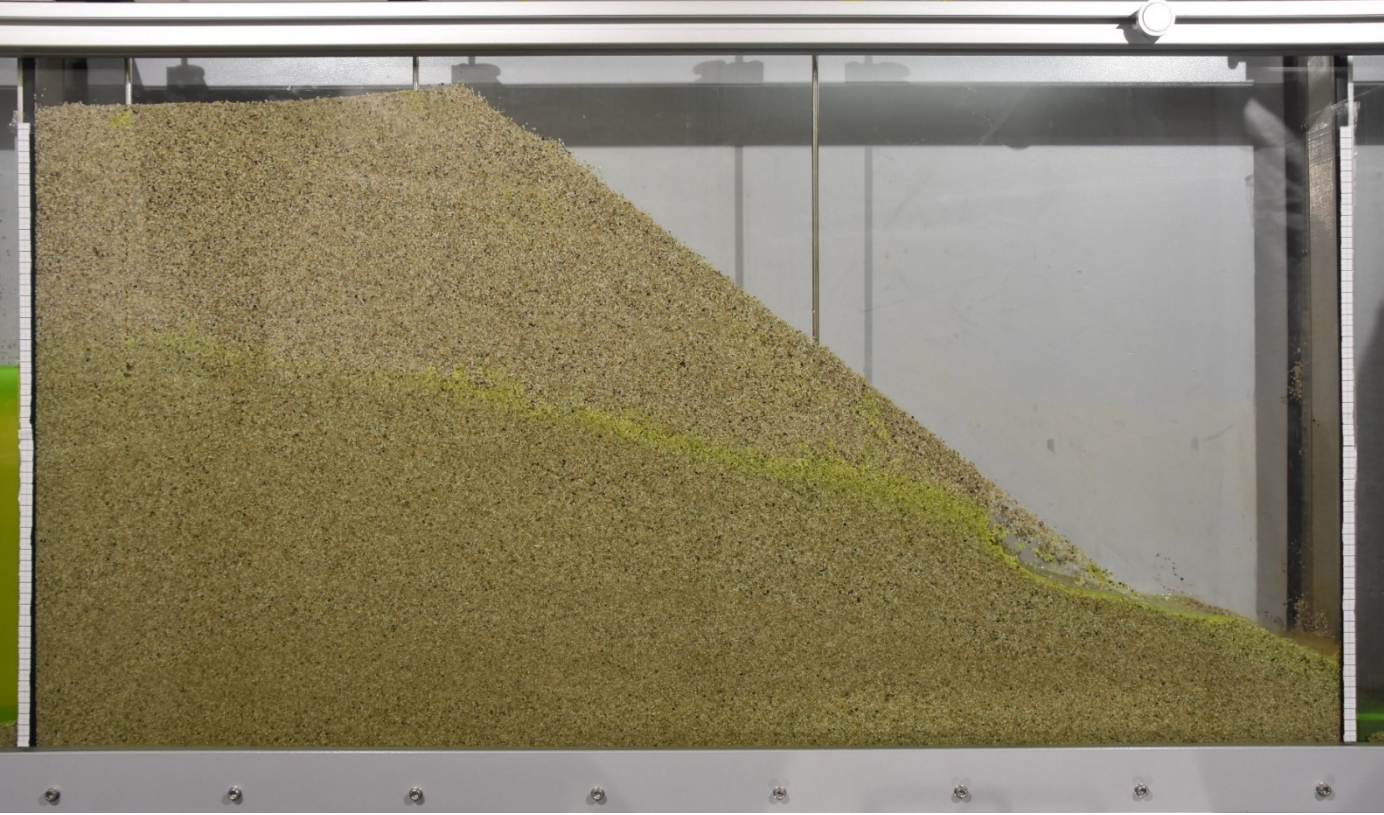


Abb. 1: Versuch zur Bestimmung der Lage der Sickerlinie. ( $\alpha = 40^\circ$ )

### Stationäre Sickerlinie

Dabei wurden in den Versuchsstand verschiedene Böschungsgeometrien hinsichtlich der luftseitigen Böschungsneigung (30°, 35°, 40°) eingebaut, um zu überprüfen inwieweit dieser Einfluss auf die Lage und die Form der Sickerlinie hat.

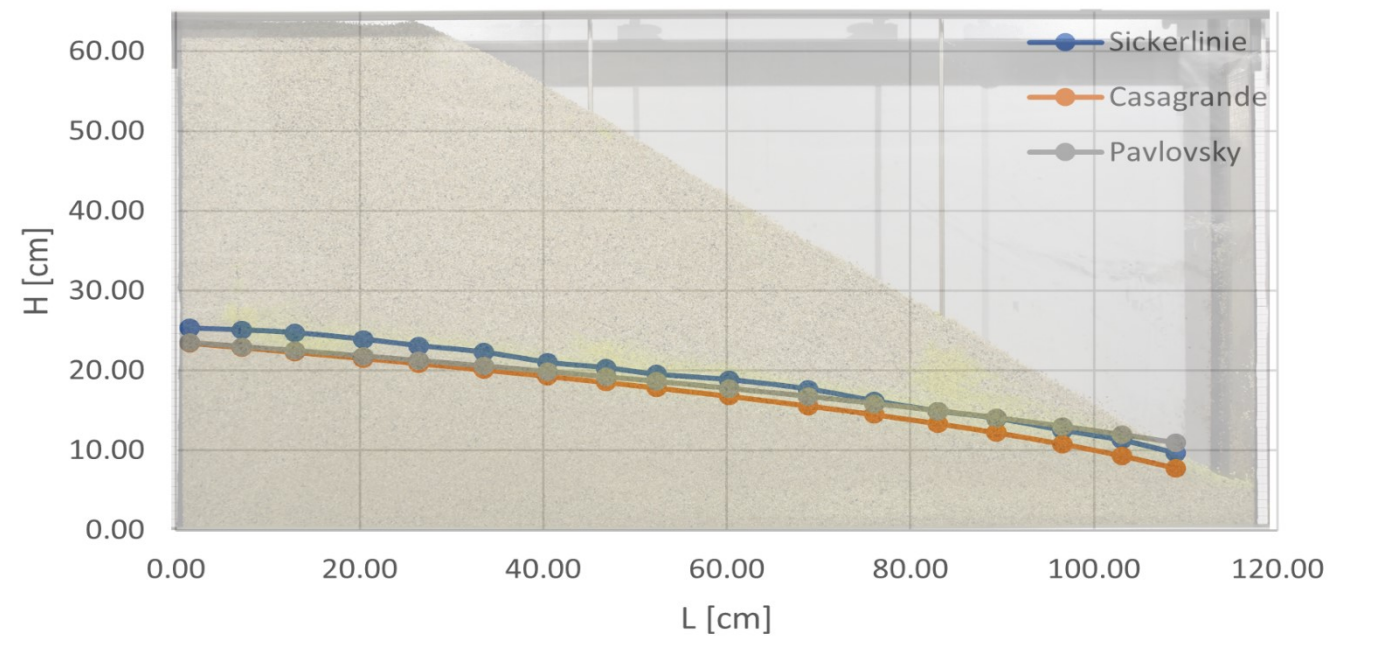


Abb. 2: Vergleich der Sickerlinien für Böschungsneigung 30°

Abbildung 2 zeigt die berechneten Sickerlinien nach Casagrande und Pavlovsky gegenüber der tatsächlichen im Versuch ermittelten Sickerlinie. Vor dem Hintergrund, dass die tatsächliche Sickerlinie im Versuch etwas tiefer liegt, bilden beide Berechnungsverfahren den Versuch genau ab. Über alle Versuche hinweg ergibt sich, dass das Berechnungsverfahren nach Pavlovsky näher an den Sickerlinien der Modellversuche liegt.

Einzig im letzten Teil der Böschungen kam es bei beiden Verfahren zu größeren Abweichungen im Vergleich zum Ergebnis der Versuche.

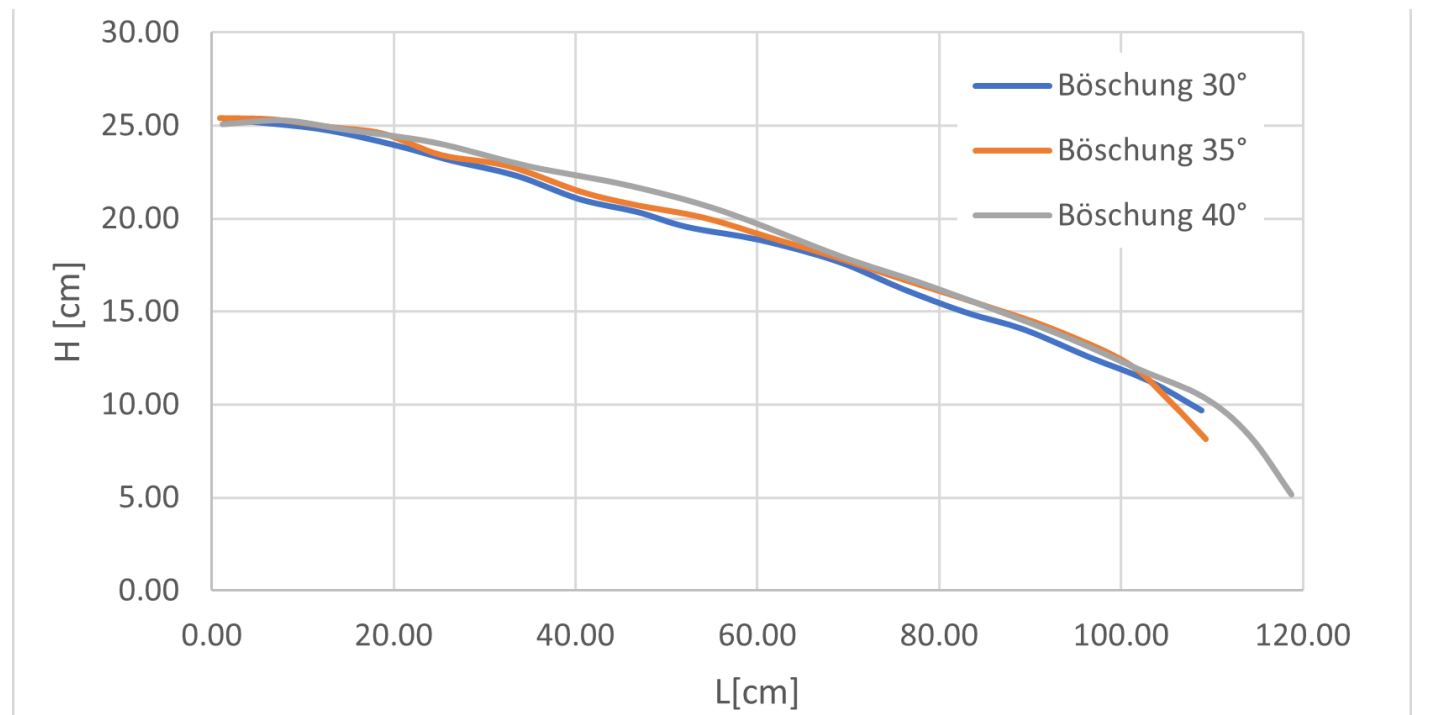


Abb. 3: Vergleich der Sickerlinien verschiedener Böschungsneigungen

Abbildung 3 stellt die Sickerlinien für verschiedene luftseitige Böschungsneigungen dar. Es ist zu erkennen, dass diese nahezu identisch sind, woraus geschlossen werden kann, dass die Böschungsneigung in den Modellversuchen keinen Einfluss auf die Lage der Sickerlinie hat.

### Nichtstationäre Sickerlinie

Zur Betrachtung des nichtstationären Zustandes wurden Porenwasserdrucksensoren verwendet. In gleicher Höhe verbaut, messen Sie die zeitabhängige Druckänderung bei Anstieg oder Abfall der Sickerlinie. Es ist festzustellen, dass sich die Sickerlinie bei einem einseitigen Anstieg des Wasserpegels von ihrer Form einer Hyperbel ähnelt, wie es auch in der Literatur [Zeller, Jürg. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau. Zürich, 1961] beschrieben wird. Das gegenteilige Verhalten ist beim Abfall des Wasserpegels zu beobachten. Die Sickerlinie folgt ihrer Form einer Parabel als kontinuierliche Folge stationärer Zustände.

Zu erkennen sind diese Eigenschaften daran, dass beim Anstieg des Wasserpegels der Sensor, welcher dem Anstieg am nächsten ist, als erster einen Druckanstieg aufnimmt. Beim Abfall des Wasserpegels ist es jedoch so, dass alle Sensoren nahezu gleichzeitig einen Druckabfall registrieren.

## Böschungsstandsicherheit

Unter dem Einfluss von strömendem Wasser sind nach Davidenkoff [Davidenkoff, Rostislav. Deiche und Erddämme Sickerströmung – Standsicherheit. Düsseldorf, 1964] grundsätzlich zwei Versagensarten zu unterscheiden. Das allgemeine Böschungsversagen, bei dem sich ein Gleitkreis über die gesamte Böschung hinweg ausbildet und das örtliche Versagen, nach welchem es zu Rutschungen kommt, wenn die Sickerlinie aus der luftseitigen Böschung austritt. Diese Rutschungen sind in der Regel auf den Bereich zwischen Fußpunkt und Austrittspunkt begrenzt. Aus den Versuchen zur Bestimmung der Sickerlinie hat sich ergeben, dass ein örtliches Böschungsversagen eintritt, sobald die Sickerlinie die luftseitige Böschung verlässt. Daraus entsteht als Rahmenbedingung für die Versuche zum allgemeinen Böschungsversagen, dass die Sickerlinie innerhalb der Böschung verbleiben muss.

### Allgemeines Böschungsversagen

Zum Herbeiführen eines allgemeinen Böschungsversagens wird eine Böschung mit maximaler Neigung (40°) in den Versuchsstand eingebaut und mit einem Kran am Böschungskopf belastet. Die Belastung wird für erdfeuchte Böschungen ( $w \approx 3,0\%$ ) durchgeführt und mit einer Kamera mit einer Aufnahme Frequenz von 1 Hz festgehalten. Es werden 2 Modifikationen getestet. Einerseits die erdfeuchte Böschung ohne Sickerlinie („trocken“), andererseits die Böschung mit Durchströmung unter Einstellung einer Sickerlinie („nass“).

Die entstandenen Bildreihen können mittels DIC-Software (GOM-Correlate) ausgewertet werden, wodurch bereits kleine Kornbewegungen im Böschungskörper sichtbar werden.



Abb. 4: Versuchsaufbau zur Belastung des Böschungskopfes



Abb. 5: horizontale Verschiebung (Mod.: „nass“;  $\alpha = 40^\circ$ ; Auflast ca. 65 kg;  $\rho \approx 1,55 \text{ g/cm}^3$ )

Abbildung 5 zeigt die horizontale Verschiebung eines Teilversuches mit Sickerlinie. Bei den „nassen“ Modi konnten tiefere Verformungen als bei den „trockenen“ ausgewertet werden. Zum anderen kann auch festgestellt werden, dass sich der Bereich hinter der Auflast weg von der Böschung bewegt (dunkelblauer Bereich), was bei den trockenen Modi nicht festgestellt werden kann. Leider war mit dem einfachen Versuchsaufbau keine genaue Kraftmessung möglich, weshalb eine quantitative Bearbeitung der Standsicherheitsunterschiede der beiden Modi nicht möglich ist. Jedoch lässt sich in Abb. 5 erkennen, dass die größten Verschiebungen oberhalb der Sickerlinie und damit ohne Einfluss der Strömungskräfte auftreten. Letztlich konnte mit der Versagensgeometrie aus den Modellversuchen auch das Versagen rechnerisch mit der Gleitkreis Methode nach Fellenius nachgewiesen werden. Dazu war jedoch die Schiefstellung (sh. Abb. 6) des Belastungsblockes zu berücksichtigen (horizontaler Kraftanteil).

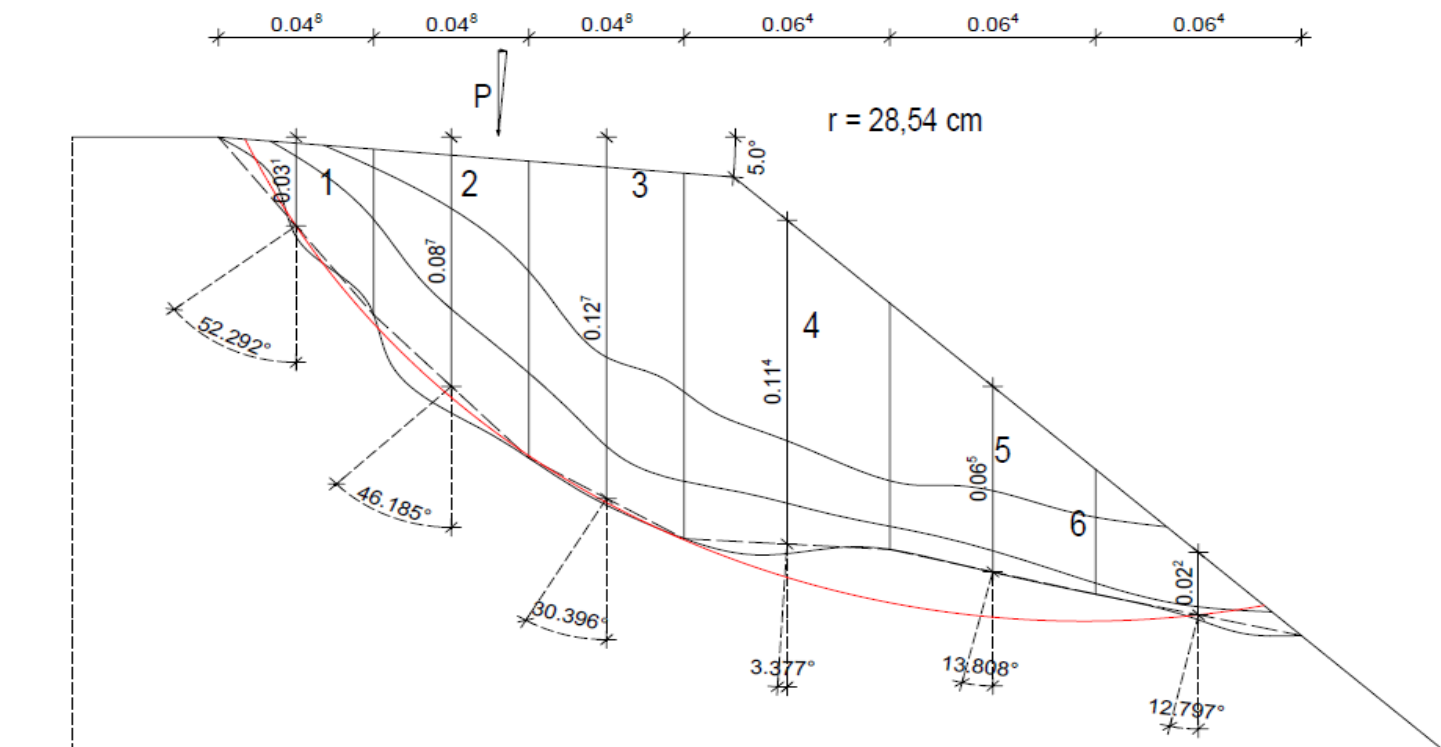


Abb. 6: Anpassung Lamellenverfahren mit Schiefstellung

**Projekt**  
Projektarbeit

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

**Wissenschaftliche Betreuung**  
Dr.-Ing. Markus Uhlig, TU Dresden

**Abgabe**  
Januar 2023