

Dr.-Ing. Eberhard Franke

## Die Wirkungen des Wassers auf die Standsicherheit

### von Böschungen

---

### Effect of Water on the Stability of Slopes



Abb. 1 Böschung im Grenzstand des Gleichgewichts nach der Methode

an der von der Böschung und der Böschungstube...  
körper (in der Böschungstube) ...  
und eine beliebige Kraft  $P$  an der Böschungstube ...  
wenn an der Böschungstube ...  
gleich große Kraft ...  
setzt - per se ...  
ist die ...  
nennbar, die ...  
Kraft  $P$  ...

Bei der Berechnung der Standsicherheit von Böschungen treten häufig Einflüsse stehenden und strömenden Wassers auf. Diese Einflüsse sind in ihrem Zusammenwirken oft nur schwer zu durchschauen. Es scheint daher nützlich, die Einflüsse des Wassers auf Böschungen anhand von 4 einfachen Grundformen darzustellen. Die Darstellung dieser Grundformen in einer systematischen Aufeinanderfolge und die Verwendung einfachster Beispiele sollen die in der Praxis meist in komplizierteren Kombinationen auftretenden Fälle entwirren helfen.

Bei der Diskussion dieser 4 Grundfälle wird das Reibungskreisverfahren zur Berechnung der Böschungsstandsicherheit verwendet. Bei Vernachlässigung der Kohäsion gestaltet sich die folgende kurze Ableitung dieses Verfahrens besonders einfach, weshalb es hier verwendet werden soll. (Das Ziel dieser Arbeit wird von den getroffenen Vereinfachungen nicht berührt).

Es werden folgende Voraussetzungen getroffen: Eine Böschung befindet sich an der Grenze des Gleichgewichtszustandes zum Bruchzustand; die Gleitfläche kann als Kreis angenähert werden (Abb. 1).

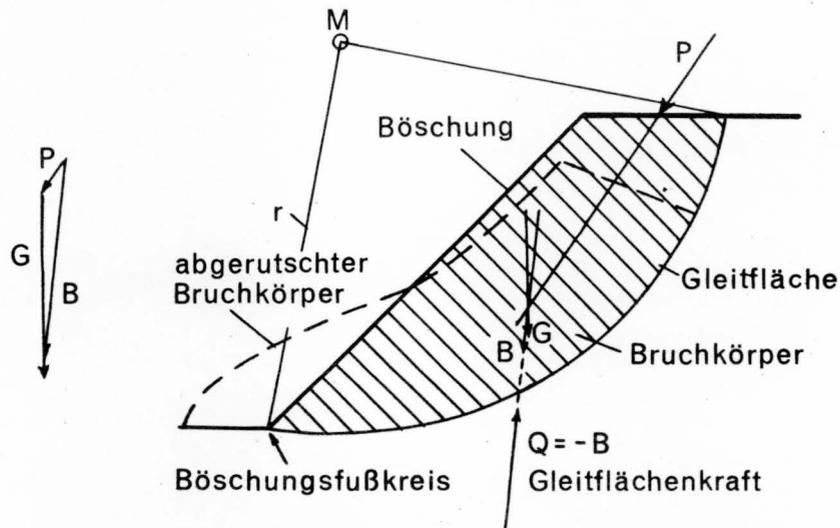


Abb. 1 Böschung im Grenzzustand des Gleichgewichts und nach dem Abrutschen

An dem von der Böschung und dem Gleitkreis begrenzten Bruchkörper (in der Abb. schraffiert) greifen sein Eigengewicht  $G$  und eine beliebige Kraft  $P$  an. Ihre Resultierende ist  $B$ . Nur wenn am Bruchkörper eine entgegengesetzt zu  $B$  gerichtete, gleich große Kraft angreift (Abb. 1), kann - wie vorausgesetzt - gerade noch Gleichgewicht bestehen. Diese Gegenkraft ist die Resultierende der in der Gleitfläche wirkenden Spannungen, die mit  $\sigma$  bezeichnet sind. Sie wird die Gleitflächenkraft  $Q$  genannt (Abb. 2).

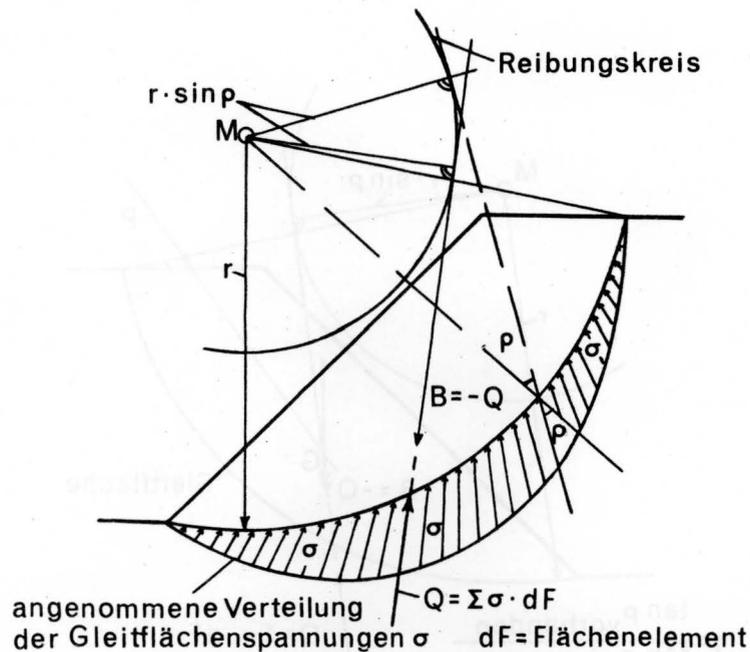


Abb. 2 Gleitflächenkraft  $Q$  als Resultierende der in der Gleitfläche wirkenden Spannungen  $\sigma$

Wenn es nun gelingt, die Gleitflächenkraft  $Q$  mit den Bodeneigenschaften, d.h. hier mit dem Reibungswinkel in Verbindung zu bringen, so ist - da  $Q$  gleich minus  $B$  ist - der Zusammenhang zwischen äußerer Belastung und Bodeneigenschaften hergestellt und die Voraussetzung zur Beurteilung der Standsicherheit der Böschung geschaffen.

Zur Verbindung zwischen  $Q$  und  $\sigma$  kann nun folgende Beziehung benutzt werden (Abb. 2): Die in der Gleitfläche wirkenden Spannungen  $\sigma$  sind im vorausgesetzten Grenzgleichgewichtsfall unter dem Reibungswinkel  $\rho$  entgegengesetzt zur Rutschrichtung geneigt, d.h. sie haben die Neigung  $\rho$  zur Normalen auf der Gleitfläche. In diesem Falle ergibt sich - wie sich aus Abb. 2 leicht ablesen läßt - eine einfache geometrische Beziehung zur Bestimmung der Richtung bzw. der Neigung der Gleitflächenspannungen  $\sigma$ : Sie tangieren nämlich einen Kreis, der mit dem Radius  $r \cdot \sin \rho$  um den Gleitkreismittelpunkt  $M$  geschlagen wird, wobei  $r$  der Radius des Gleitkreises ist. Der  $r \cdot \sin \rho$ -Kreis wird auch Reibungskreis genannt. Er hat dem Berechnungsverfahren den Namen gegeben.

Auf der Grundlage dieser Entwicklung gelingt es nun, die Verbindung zwischen der Gleitflächenkraft  $Q$  mit dem Reibungswinkel  $\rho$  herzustellen. Man kann nämlich näherungsweise annehmen, daß nicht nur die Gleitflächenspannungen  $\sigma$ , sondern auch ihre Resultierende  $Q$  den  $r \cdot \sin \rho$ -Kreis tangiert. Man

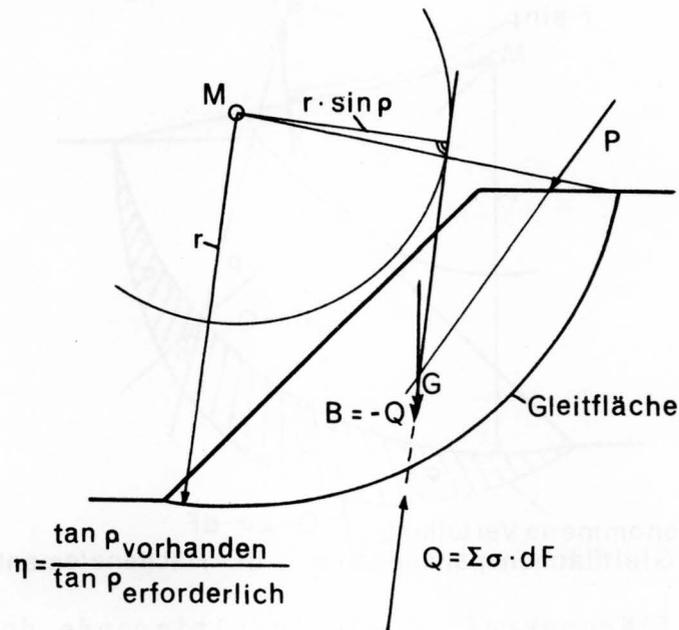


Abb. 3 Die Spannungen  $\sigma$  in der Gleitfläche tangieren einen Kreis vom Radius  $r \cdot \sin \rho$  um den Gleitkreismittelpunkt

braucht also nur den senkrechten Abstand zwischen der Gleitflächenkraft  $Q$  bzw. zwischen der Resultierenden  $B$ , die ja gleich minus  $Q$  ist, zu messen und erhält damit den Wert  $r \cdot \sin \rho$ . Damit ergibt sich folgendes einfache Berechnungsschema (Abb.3): Zeichne einen Kreis durch den Fuß der Böschung; bestimme Schwerpunkt und Gewicht des Bruchkörpers; bestimme aus seinem Gewicht  $G$  und der Kraft  $P$  deren Resultierende  $B$ . Messe den senkrechten Abstand zwischen  $B$  und dem Gleitkreismittelpunkt  $M$ . Dieses Maß ist  $r \cdot \sin \rho$ . Daraus ist jetzt leicht  $\sin \rho$  und  $\rho$  selbst zu berechnen.

Der Boden müßte nun genau den entsprechenden Reibungswinkel  $\rho$  besitzen, damit gerade noch kein Abrutschen der Böschung eintritt. In Wirklichkeit hat aber der Boden, wenn man von einer zufälligen Ausnahme absieht, einen anderen Reibungswinkel als den mit dem vorstehenden Verfahren ermittelten. Zur Bestimmung des Grades der Standsicherheit  $\eta$  der untersuchten Böschung müssen die beiden  $\rho$ -Werte verglichen werden. Dies geschieht, indem man den Tangens des in Wirklichkeit vorhandenen  $\rho$ -Wertes durch den Tangens-Wert des ermittelten, zur Vermeidung des Abrutschens der Böschung gerade erforderlichen  $\rho$ -Wertes dividiert. Der Quotient ist die Sicherheit des untersuchten Bruchkörpers gegen Abrutschen.

Auf die Möglichkeit, die Standsicherheit anders zu definieren, soll hier nicht eingegangen werden.

Der vorhandene Reibungswinkel des Bodens, aus dem die Böschung besteht, muß von Laborversuchen her bekannt sein oder aus Tabellen einschlägiger Handbücher geschätzt werden.

Auf die geschilderte Weise sind nun noch mehr Bruchkörper bzw. andere Gleitflächen zu untersuchen und die entsprechenden Sicherheiten zu bestimmen. Die Prozedur ist solange zu wiederholen, bis der kleinste Sicherheitswert, der dann für die Böschung maßgebend ist, gefunden wird.

Ein Beispiel, bei dem Gleitkreismittelpunkte für Bruchkörper gleicher Sicherheit miteinander verbunden sind, zeigt Abb. 4. Es entstehen auf diese Weise "Höhenlinien", die den zu suchenden Gleitkreismittelpunkt mit  $\eta_{\min}$  einschließen.

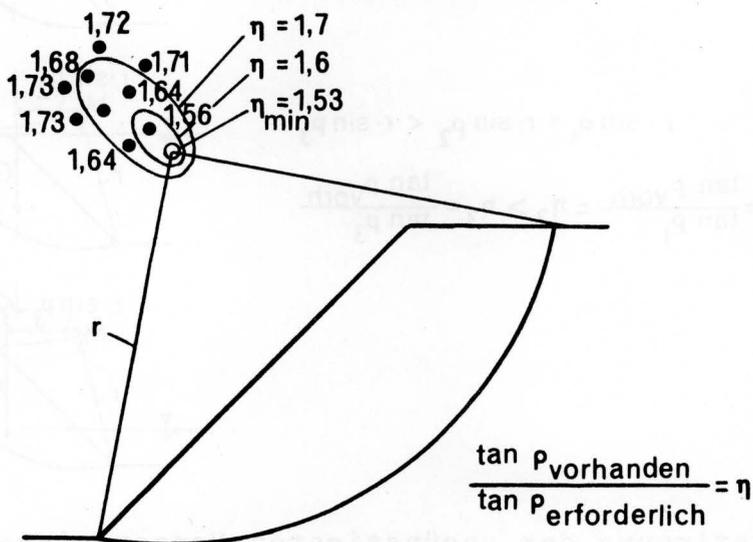


Abb. 4 Linien gleicher Standsicherheit als Verbindungslinien von Gleitkreismittelpunkten gleicher Standsicherheit

Es ist noch nachzutragen, daß bei Reibungswinkeln größer als  $5^\circ$  die Gleitkreise immer durch den Fuß der Böschung verlaufen, außer der Boden ist unterhalb der Böschungsfußebene schlechter als darüber.

Ferner wurde gesagt, daß nur näherungsweise angenommen wurde, die Resultierende  $Q$  der Gleitflächenstressungen  $\rho$  berühre den Reibungskreis. In Wirklichkeit geht  $Q$  in gewissem Abstand am Reibungskreis vorbei. Genau kann dieser Abstand nicht ermittelt werden, weil man die Verteilung der Gleitflächenstressungen  $\rho$  nicht kennt und die Lage ihrer Resultierenden  $Q$  von dieser Verteilung abhängt. Darin besteht eine statische Unbestimmtheit des Problems. Die Beeinflussung der Lage von  $Q$  durch die Spannungsverteilung auf der Gleitfläche ist aber glücklicherweise selbst bei sehr fehlerhaften Annahmen über diese Verteilung i.allg. gering, so daß die getroffene Annah-

me, daß Q den Reibungskreis berührt, in den meisten Fällen gerechtfertigt ist, zumal sie i.allg. auf der sicheren Seite liegt.

Es folgen nun die 4 angekündigten Sonderfälle:

1. Eine Böschung liege teilweise unter dem Wasserspiegel. Wir vergleichen diesen Fall jetzt mit 2 anderen. Einmal liege dabei die Böschung ganz über dem Wasserspiegel und einmal ganz unter dem Wasserspiegel. Es soll nur die Schwerkraft wirken.

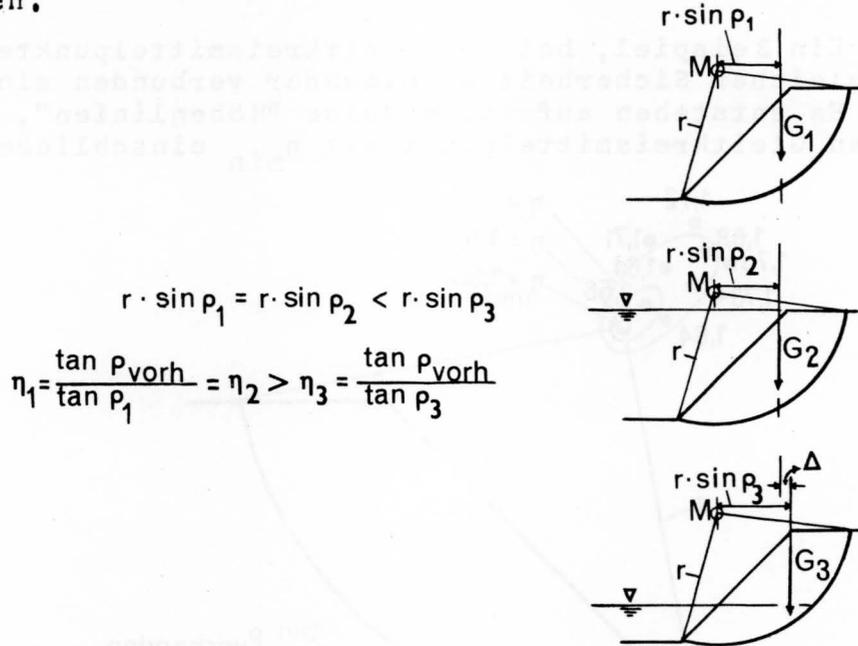


Abb. 5 Bestimmung der ungünstigsten Wasserspiegellage vor der Böschung ( $\Delta = \text{Max.}$ )

In Abb. 5 sind diese 3 Fälle untereinander gezeichnet. Ist die Böschung ganz unter oder ganz über Wasser, so bleibt die Schwerpunktlage die gleiche. Ist die Böschung teilweise unter Wasser, so rückt der Schwerpunkt nach rechts, weil der untere, eingetauchte Böschungsteil durch den Auftrieb an reibungswirksamem Gewicht verliert, während der obere, über dem Wasserspiegel verbleibende Teil sein volles Gewicht behält. Daraus ergibt sich, daß in den ersten beiden Fällen der Abstand der Gewichtsresultierenden vom Gleitkreismittelpunkt M kleiner ist als im letzten. In den ersten beiden Fällen ist also  $r \cdot \sin p$  kleiner als im letzten, also ist - weil immer die gleiche Böschung und der gleiche Gleitflächenmittelpunkt verwendet wurde -  $\sin p_{\text{erf}}$  in den ersten beiden Fällen kleiner als im letzten und die Sicherheit in den ersten beiden Fällen größer als im letzten. Es folgt also, daß der Fall einer teilweise im Wasser eintauchenden Böschung ungünstiger ist als der Fall einer Böschung über Wasser, aber auch als der Fall einer ganz unter Wasser befindlichen Böschung.

Der ungünstigste Fall tritt ein, wenn der Wasserspiegel etwa in 1/3 der Böschungshöhe liegt. Das wird auch klar, wenn man die Neigung der Gleitflächenspannungen längs der Gleitfläche verfolgt (Abb. 6).

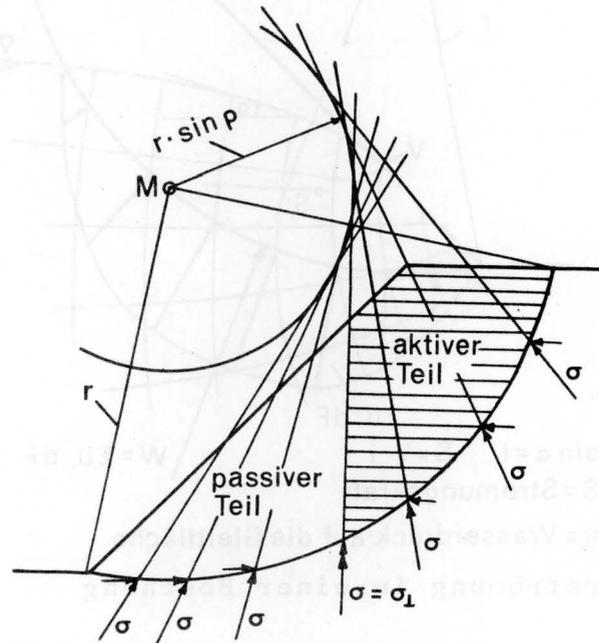


Abb. 6 Teilung der Böschung durch senkrechte Tangente an den  $r \cdot \sin \rho$ -Kreis in aktiven und passiven Teil

Rechts von der senkrechten Tangente an den  $r \cdot \sin \rho$ -Kreis haben die Gleitflächenspannungen talwärts gerichtete Komponenten, links davon bergwärts, d.h. der Rutschung widerstehende Komponenten. Daher nennt man den linken Böschungsteil auch den passiven, den rechten Teil den aktiven. Taucht nun der passive Teil ins Wasser ein, so wird sein Gewicht durch den Auftrieb vermindert und damit auch die widerstehenden Reibungskräfte, während die aktiven, rutschungsfördernden Kräfte in ihrer Größe im wesentlichen erhalten bleiben.

2. Es wird nun der Fall behandelt, daß ein stationärer Grundwasserstrom die Böschung durchströmt. Die Strömung übt auf das Korngerüst eine Reibungskraft in Richtung der Strömung aus. Diese Strömungskraft  $S$  ist umso größer, je größer das Gefälle  $i$  und je größer das durchströmte Bodenvolumen  $V$  sind. Man kann also schreiben  $S = i \cdot V$ .

Nun ist in einer Böschung aber das Gefälle nicht konstant, so daß die Wirkung der Strömung auf die Böschung anders ermittelt werden muß. Das geschieht wie folgt (Abb. 7): Man ermittelt für einen bestimmten Bruchkörper die in Richtung des Gleitflächenmittelpunktes wirkenden Wasserdrücke  $u$  und ihre Resultierende  $W$  aus dem als gege-

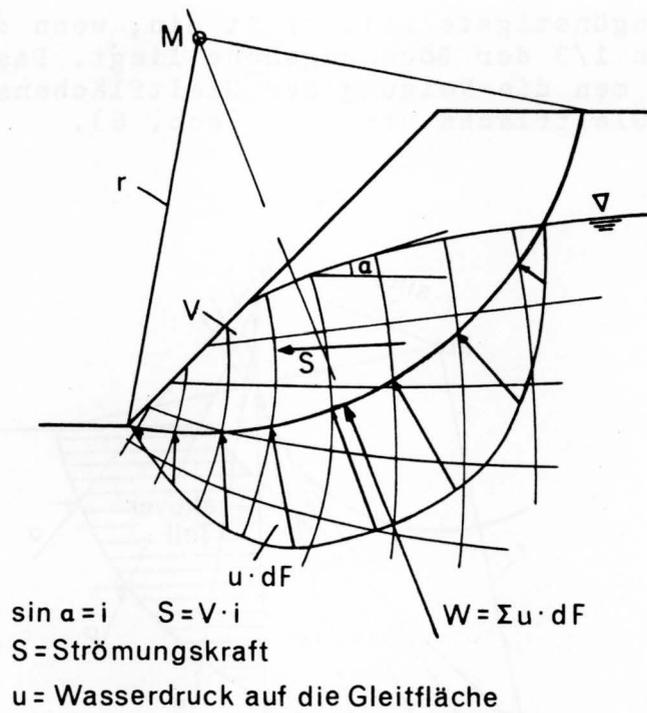


Abb. 7 Sickerströmung in einer Böschung

ben anzusehenden Strom- und Potentialliniennetz. Die Aufgabe kann dann auf 2 Arten gelöst werden:

Es ist das Gesamtgewicht  $G$  des Bruchkörpers einschl. des enthaltenen Wassers mit der Resultierenden der Wasserdrücke  $W$  zusammzusetzen (Abb. 8). Es ergibt sich die Resultierende  $B$ . Mit dieser wird jetzt weiter gearbeitet, wie bei der Ableitung des Reibungskreisverfahrens gezeigt.

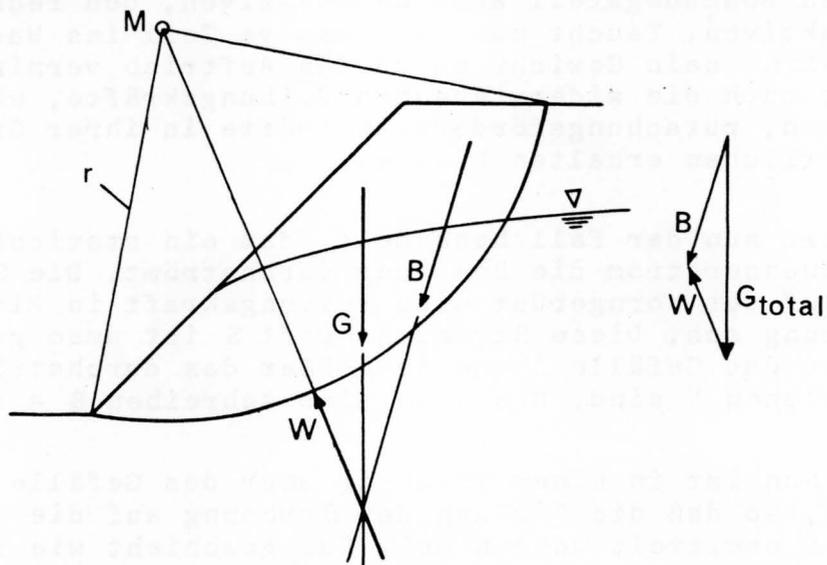


Abb. 8 Erfassung des Einflusses der Sickerströmung über den Gleitflächenwasserdruck  $W = \sum u$

Eine deutlichere Vorstellung von der Mechanik der Vorgänge erhält man aber, wenn man wie folgt vorgeht: Man kann sich den Bruchkörper aus 2 Teilen zusammengesetzt denken (Abb. 9). Der Teil  $V_1$  liegt über, der Teil  $V_2$  unter dem Wasserspiegel. Das Gesamtgewicht, das im Krafteck von Abb. 8 nicht unterteilt war, kann damit aufgeteilt werden in das Gewicht  $G_1$  des Teiles  $V_1$ , in das Gewicht  $G_{a2}$  des Teiles  $V_2$ , das <sup>1</sup> mit dem Raumgewicht unter Auftrieb zu berechnen ist, und in das Gewicht  $G_{w2}$ , das der durch den Teil  $V_2$  verdrängten Flüssigkeitsmenge entspricht. Das Gewicht  $G_{w2}$  ist dann gleich dem in den Poren des eingetauchten Bruchkörperanteiles  $V_2$  befindlichen Wassers plus dem beim Ansatz von  $G_{a2}$  infolge Auftriebes weggelassenen Gewicht. Setzt man nämlich die in der Gleitfläche wirkenden Wasserdrücke voll an, so darf man auch bei der Gewichtskraft  $G_{w2}$  den Auftrieb nicht weglassen.

Aus dem Krafteck von Abb. 9 ergibt sich nun aus der Zusammensetzung von  $G_{w2}$  mit  $W$  die Strömungskraft  $S$ , welche die tatsächliche Richtung der Beanspruchung der Böschung infolge der Grundwasserströmung angibt. Sie liegt - wie zu erwarten war - etwa parallel zur Hauptströmungsrichtung.

Auf diese Weise erkennt man auch, daß man die Strömungskraft näherungsweise berechnen kann als  $S = V_2 \cdot \sin \alpha$ , wobei  $\alpha$  die durchschnittliche Neigung der Strömung <sup>2</sup> ist. Sie greift im Schwerpunkte des Volumens  $V_2$  an.

3. Es folgt der Fall der plötzlichen Absenkung eines bis zur Böschungsoberkante anstehenden Wasserspiegels bei einer Böschung aus sandigem, durchlässigen Boden auf weniger durchlässigem Untergrund (Abb. 10). Das Strom- und

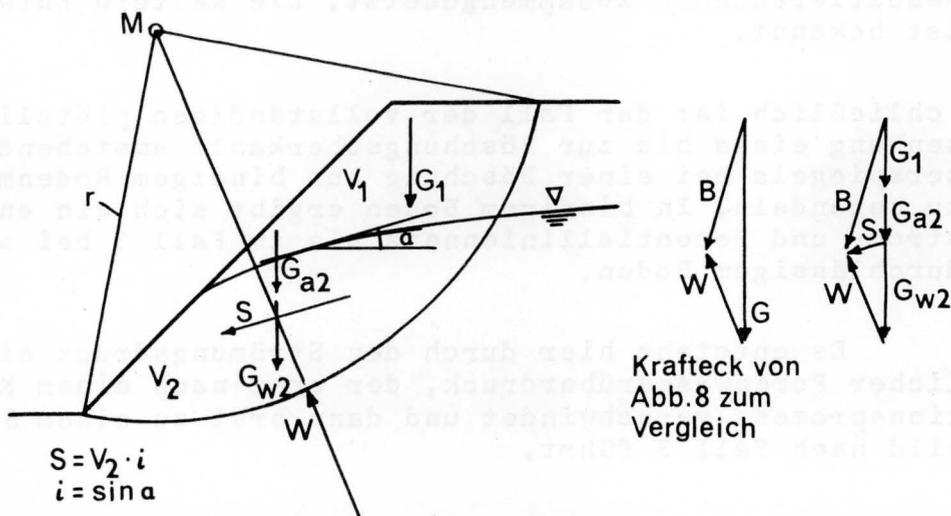


Abb. 9 Erfassung des Einflusses der Sickerströmung mit dem Strömungsdruck  $S$  und Zusammenhang mit dem Gleitflächenwasserdruck  $W$

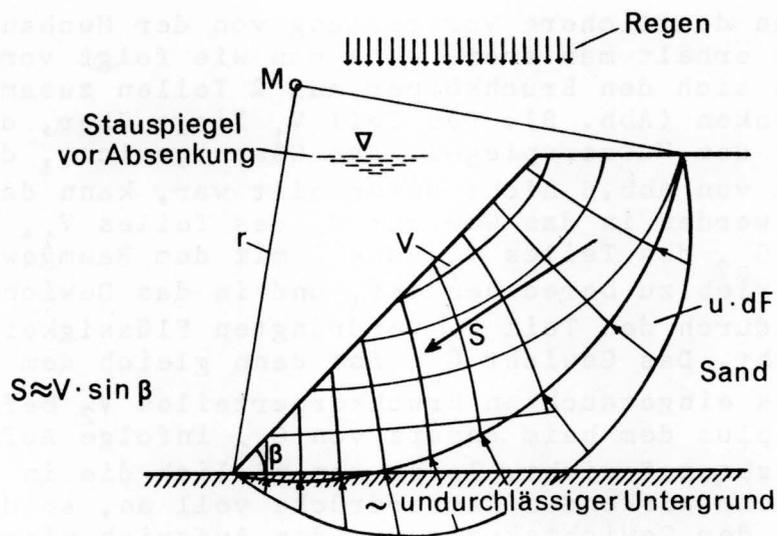


Abb. 10 Sickerströmung und Wasserdrücke  
a) bei plötzlicher Wasserspiegelabsenkung in Böschungen aus nichtbindigen Böden  
b) bei langen Regenzeiten

Potentialliniennetz für diesen Fall ist identisch mit dem Fall eines Dauerregens auf eine solche Böschung, wobei die Niederschlagsstärke aber größer als die Durchlässigkeit sein muß.

In diesen Fällen sieht das Stromliniennetz genauso aus, als wenn ein dünner Wasserfilm über die Böschung sickert (Abb.10). Der Strömungsdruck kann wie im vorigen Abschnitt bestimmt werden.

Dieser Fall ist für Böschungen aus sandigem Material der ungünstigste. Die Strömungskraft ist etwa hangparallel gerichtet. Sie wird mit dem Gewicht des Bruchkörpers zur Resultierenden  $B$  zusammengesetzt. Die weitere Entwicklung ist bekannt.

- Schließlich ist der Fall der vollständigen plötzlichen Absenkung eines bis zur Böschungsoberkante anstehenden Wasserspiegels bei einer Böschung aus bindigem Bodenmaterial zu behandeln. In bindigem Boden ergibt sich ein anderes Strom- und Potentialliniennetz als im Fall 3 bei stärker durchlässigem Boden.

Es entsteht hier durch den Strömungsdruck ein zusätzlicher Porenwasserüberdruck, der erst nach einem Konsolidationsprozess verschwindet und dann erst zu einem Strömungsbild nach Fall 3 führt.

Da es schwierig ist, das Strom- und Potentiallinien-netz für diesen Fall im Zeitpunkt unmittelbar nach der plötzlichen Absenkung zu entwerfen, erfaßt man die hydraulische Druckverteilung auf den Bruchkörper summarisch (Abb.11).

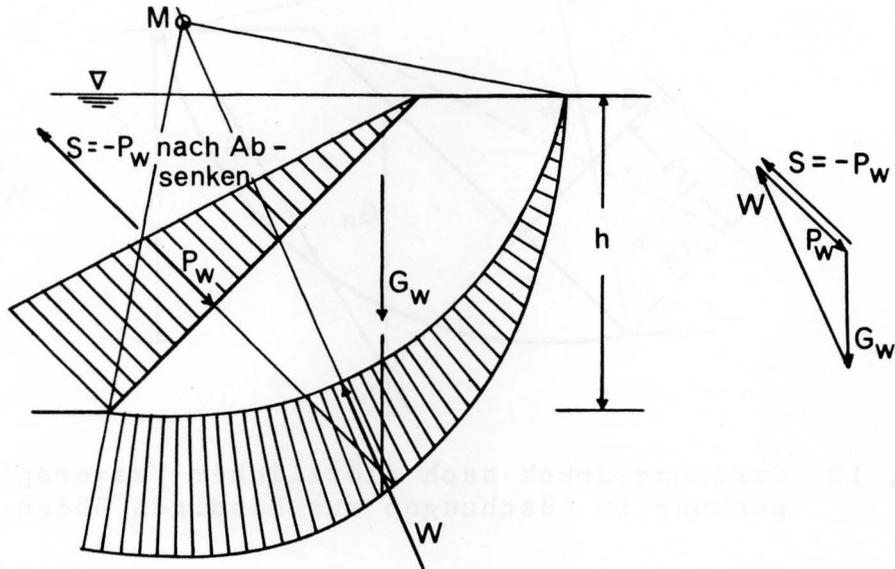


Abb.11 Wasserdrücke vor und nach plötzlicher Wasserspiegelabsenkung auf Böschungen aus bindigen Böden

Auf Abb.11 werden die Wasserdrücke auf die eingetauchte Böschung angegeben. Ihre Größe läßt sich hier leicht übersehen.  $G_w$  ist dabei das Gewicht der vom Bruchkörper verdrängten Flüssigkeitsmenge, das gerade von  $P_w$  und  $W$  im Gleichgewicht gehalten wird.

Nach dem plötzlichen Absenken fällt  $P_w$  (Abb.12) fort. Wegen des schon erwähnten Porenwasserüberdruckes infolge Strömungsdruck bleiben aber Größe und Lage von  $W$  im ersten Moment voll erhalten; ebenso bleibt  $G_w$  nach Lage und Größe erhalten. Die Resultierende aus  $G_w$  und  $W$  ist wieder eine Strömungskraft  $S$ , die hier entgegengesetzt und gleich groß mit der beim Absenken des Wasserspiegels weggefallenen Kraft  $P_w$  ist, wie aus dem Kräfteck von Abb. 11 folgt.

Nun ist das Gewicht des Bruchkörpers (mit dem Raumgewicht unter Auftrieb gerechnet) mit der Strömungskraft  $S = -P_w$  zur Resultierenden  $B$  zusammzusetzen und die Standsicherheit der Böschung für die Beanspruchung durch  $B$  zu ermitteln.

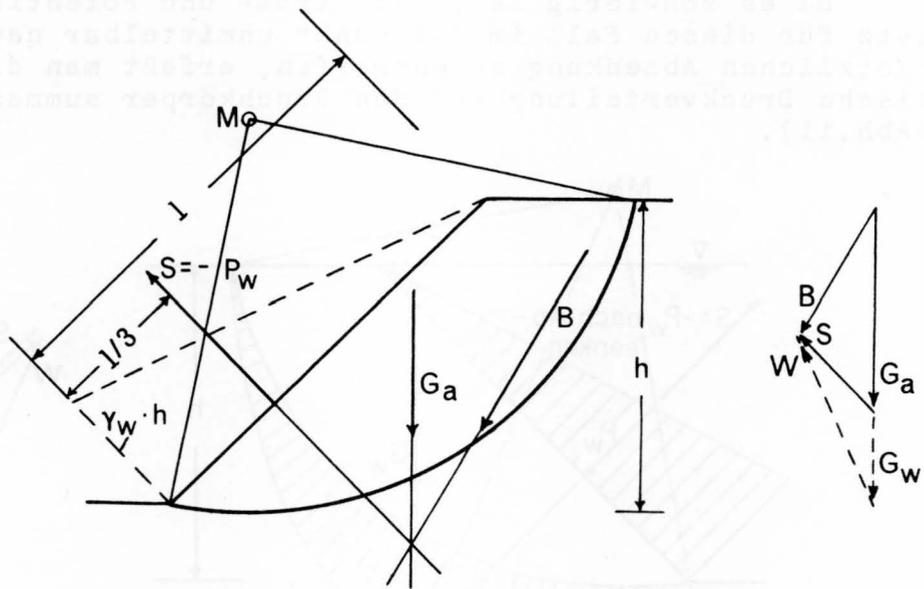


Abb. 12 Strömungsdruck nach plötzlicher Wasserspiegelabsenkung in Böschungen aus bindigen Böden

Zusammenfassung

Auf Abb.13 sind die 4 behandelten Sonderfälle nochmal zusammengestellt.

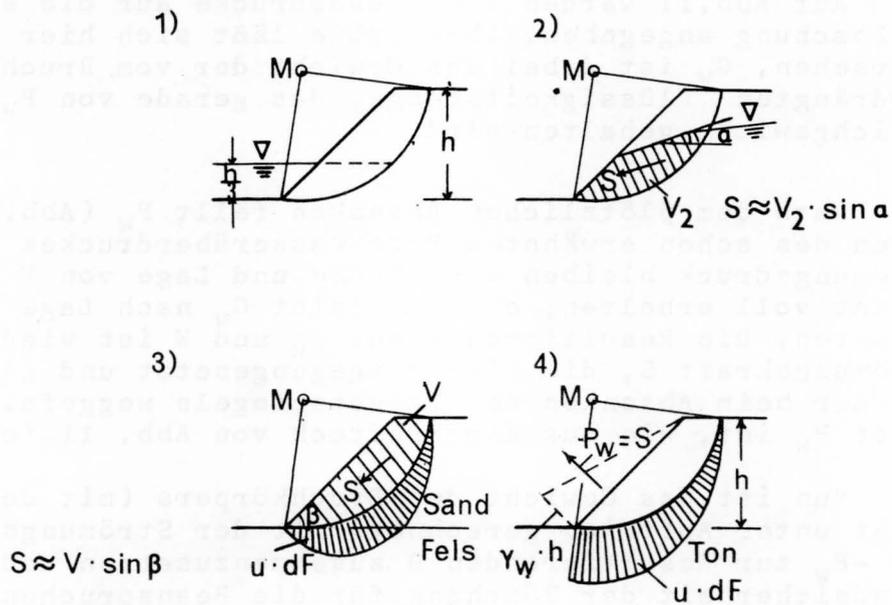


Abb. 13 Zusammenstellung von 4 Fällen der Böschungsbeanspruchung durch Wasser

Im Fall 1 ist die ungünstigste Wasserspiegellage etwa in 1/3 der Böschungshöhe.

In den Fällen 2, 3 und 4 sind die Strömungskräfte angegeben, die zusätzlich zu den Gewichts- und eventuellen äußeren Kräften anzusetzen sind.

In den Fällen 2 und 3 wird außerdem gezeigt, wie man einfach eine näherungsweise Bestimmung von Größe und Lage der Strömungskraft mit der Formel  $S = V \cdot i$  erhält. Die Größe ergibt sich aus der genannten Formel, die Lage ist gegeben durch die Hauptströmungsrichtung und den Schwerpunkt des durchströmten Bruchkörpervolumens.

Bei den Skizzen der Fälle 3 und 4 sind außerdem die in der Gleitfläche wirkenden Wasserdrücke aufgezeichnet worden, damit der Unterschied zwischen diesen beiden Fällen noch einmal deutlich wird.

Die Möglichkeit des Auftretens der Fälle 1 und 2 wird jedem aus der Praxis bekannt sein. Insbesondere ist ein absinkender Wasserspiegel mit nachströmendem Grundwasser, also eine Kombination der Fälle 1 und 2 gefährlich. Die Fälle 3 und 4 werden in der vorausgesetzten krassen Form in der Praxis zwar nicht auftreten. Sie können aber zur Schaffung von Grenzwerten für an sich weniger extreme Fälle gute Dienste leisten.

In der ersten Phase der Entwicklung sind die Aufgaben der Verwaltung und der Wirtschaft eng miteinander verbunden.

Die zweite Phase ist durch die Trennung der Verwaltung von der Wirtschaft gekennzeichnet. Die Verwaltung übernimmt die Aufgaben der Planung und der Kontrolle, während die Wirtschaft die Produktion und den Vertrieb übernimmt.

In der dritten Phase wird die Verwaltung von der Wirtschaft getrennt und als eigenständige Institution etabliert. Die Verwaltung ist nun für die Planung und die Kontrolle der Wirtschaft verantwortlich.

Die vierte Phase ist durch die Entwicklung einer modernen Verwaltung gekennzeichnet. Die Verwaltung ist nun eine komplexe Institution, die für die Planung, die Kontrolle und die Ausführung der Wirtschaftspolitik verantwortlich ist.