

Einfluss von temporär auftretendem Grundwasser auf die Standsicherheit von Straßeneinschnittsböschungen

FA 5.195

Forschungsstellen: Dr. Spang, GmbH, Witten

Hochschule für angewandte Wissenschaften, Augsburg [Prof. Dr.-Ing. J. Gattermann]

Bearbeiter: Denne, S. / Festag, G. / Gattermann, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Dezember 2022

- Neigungen von einzelnen Horizonten innerhalb des Böschungskörpers in Richtung des Böschungsschnitts;
- Mächtigkeit gering beziehungsweise stark durchlässiger Horizonte;
- Bodenarten mit stark veränderlichen Scherparametern.

1 Einleitung

Bei der Herstellung von Einschnitten beziehungsweise Böschungen können unerwartete Rutschungen beziehungsweise Geländebrüche auftreten. Tritt dies während der Bauausführung auf, werden Arbeitsunterbrechungen zur Erkundung der Ursachen sowie anschließende Sanierungsmaßnahmen notwendig. Ein Böschungsversagen kann viele Ursachen haben, häufig ist jedoch eine nicht zutreffende Einschätzung der Grundwasser-/Schichtwasserverhältnisse ursächlich. Darüber hinaus können durch temporär veränderliche Grundwasser-/Schichtwasserverhältnisse auch sekundäre Effekte, wie zum Beispiel reduzierte Scherparameter hervorgerufen werden. Durch die fehlerhafte oder unzureichende Erfassung der oben genannten Einflüsse können sich bei der Planung Ausführungsvarianten ergeben, die ein nicht ausreichendes Sicherheitsniveau aufweisen beziehungsweise sogar zum Versagen führen können.

Durch temporär auftretendes Schichtwasser kann die Standsicherheit einer Böschung reduziert werden beziehungsweise bei ungünstigen Randbedingungen kann Schichtwasser auch zu einem Böschungsversagen führen. Unter Berücksichtigung der üblichen Berechnungsverfahren für die Standsicherheit von Böschungen sind zunächst die folgenden Einflüsse auf die Standsicherheit denkbar:

- direkte Einwirkungen aus strömendem oder stauendem Wasser in wasserführenden Baugrundsichten wie Porenwasserüberdruck, Strömungsdruck, Wasseranstau und
- indirekte Einwirkungen, die sich aus der Einwirkung von Wasser ergeben; zum Beispiel Veränderungen der Scherparameter infolge Aufweichens von einzelnen Bodenhorizonten.

Diese Einflüsse auf die Standsicherheit von Böschungen können durch verschiedene Faktoren beziehungsweise Randbedingungen noch zusätzlich verstärkt werden. Hier sind neben den üblichen Böschungsparametern wie Höhe und Neigung unter anderem die folgenden Aspekte hervorzuheben:

2 Vorbetrachtungen

In einem ersten Schritt wurden im Rahmen einer Literaturstudie bekannte Schadensfälle erfasst und systematisch ausgewertet. Für die Datenerhebung wurden Fachzeitschriften, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Tagungsbänder sowie der eigene Archivbestand zusammengetragen, gesichtet und ausgewertet. Zusätzlich erfolgte eine Anfrage an die einzelnen Landesämter/Landesbetriebe für Straßenbau und Verkehr in Deutschland, an die DB Netz AG sowie an Einzelpersonen, mit denen in anderen Projekten zusammengearbeitet wurde. Insgesamt wurden 84 Schadensfälle aufgenommen.

Die identifizierten Schadensfälle wurden unter anderem hinsichtlich der Geologie, der Hydrologie, der gegebenenfalls bereits festgestellten Schadensursache sowie den Schadenskosten kategorisiert und in eine Datenbank aufgenommen. Besonderes Augenmerk wurde auf Angaben zum Zeitpunkt des Schadenseintritts, zur Bau- beziehungsweise Standzeit der Böschung, zu einer vorhandenen beziehungsweise nicht vorhandenen Entwässerung, zum Böschungstyp, zur Höhe beziehungsweise Tiefe des An- oder Einschnitts und zur Neigung der Böschung gelegt.

Nach Auswertung der aufgenommenen Schadensfälle wurden wesentliche Aspekte im Zusammenhang mit den Schadensfällen ermittelt und kategorisiert. Die nachfolgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht der fünf Kategorien mit der eingesetzten Ordnungscharakteristik.

Tabelle 1: Klassifikation der Ursache

| Zeitpunkt des Auftretens von Wasser | Art der Wasserführung | Baugrundaufbau bzgl. Wasserführung | Planungsaspekte | Sonstiges |
|---|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| temporär | Grundwasserspiegel- linie | homogener Baugrund, aufweichend | nicht ausreichende Entwässerung | unklar |
| dauerhaft | Schichtwasser | Durchlässigkeitsunter- schiede | Schwächung des Widerlagers | Sonstiges |
| beim Bau nicht vor- laufend entwässert | Staudruck | dedizierte Schwächezone | zusätzliche Auflast | |
| | Strömungsdruck | Verwitterung | | |
| | Oberflächenwasser / Erosion | Schrumpf- / Quellverhalten | | |

Aus der Analyse der Schadensfälle in der Datenbank ist bekannt, dass häufig einsickerndes Wasser beziehungsweise ein Überangebot von Niederschlagswasser ein auslösendes Ereignis darstellt. Das in den oberflächennahen Bereich einsickernde Niederschlagswasser führt dabei zu einem gegebenenfalls erhöhten Strömungsdruck und zudem zu einer Herabsetzung der Scherfestigkeit auf einer meist bindigen Schicht. In diesem Zusammenhang wird bei Schäden oft auch das Auftreten von Tonsteinen oder Tonschiefer im Untergrund genannt, die bei Wasserzutritt eine Scherfläche mit nur geringer Scherfestigkeit bilden. Zudem wird die Veränderlichkeit der Gesteine mitunter als Ursache genannt. Hierbei kann sich innerhalb einer Böschung durch Zersetzung und Veränderung der oberflächennahen Schichtpakete nach einigen Jahren eine Lockergesteinsauflage bilden, die dann aufgrund reduzierter Scherfestigkeiten ein Versagen begünstigt.

Um die Einflüsse auf die Böschungsstandsicherheit qualitativ bewerten zu können, wurde eine Reihe von Fällen mit verschiedenen Berechnungsverfahren und unter Variation der genannten Einflussparameter mit einer einfachen Böschungsgeometrie (Neigung 1:1,5 mit 10 m Böschungsbreite) durchgeführt. Aus diesen Berechnungen konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die Wasserdruckansätze, die für stationär durchströmte Böschungen Verwendung finden, sind für instationäre Strömungsvorgänge, wie sie häufig bei geschichtetem Baugrund und temporären Wasserzutritten auftreten, nur eingeschränkt verwendbar. Allerdings führt die Durchströmung von Teilbereichen einer Böschung nicht zu höheren Ausnutzungsgraden im Vergleich zu einer vollständig durchströmten Böschung. Anders sieht es aus, wenn es zu einem Aufstau von Wasser in einzelnen Schichten kommt. Hier kann ein erheblicher Wasserdruck entstehen, der die Widerstände gegen Böschungsbruch erheblich mindern kann.

Aus den Ergebnissen ist außerdem erkennbar, dass zumindest für die gewählten Randbedingungen geringfügige Abminderungen der Scherparameter nur einen eher mäßigen Einfluss auf die Standsicherheit haben. Erst bei recht großen Abminderungen der Scherparameter ist ein deutlicher Einfluss auf die Standsicherheit feststellbar. Um die Abhängigkeit der Scherparameter vom Wassergehalt zu untersuchen, wurden an exemplarisch ausgewählten Böden (leicht- und mittelplastische Tone) Scherversuche bei unterschiedlichen Wassergehalten und damit unterschiedlichen Konsistenzen ausgeführt. Mit den Scherversuchen konnte festgestellt werden, dass mit abnehmendem Wassergehalt und damit zunehmender Konsistenz die Scherparameter ansteigen (Bild 1). Dies betrifft insbesondere die Kohäsion, die bei breiiger Konsistenz Werte von nahezu Null annimmt und bei halbfester Konsistenz Werte größer 10 kN/m². Aber auch die Reibungswinkel zeigen tendenziell einen Anstieg der Werte mit zunehmender Konsistenz, auch wenn der Einfluss hier deutlich geringer erscheint.

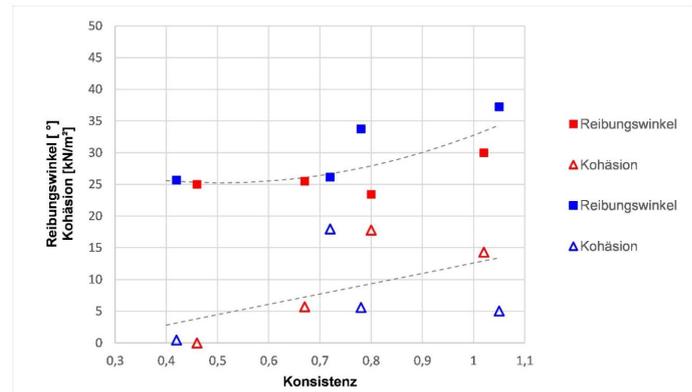


Bild 1: Scherparameter ϕ und c von leicht- und mittelplastischen Tonen in Abhängigkeit von der Konsistenz

3 Messverfahren für Grund- und Schichtwasser

In der Geotechnik wird auftretendes Wasser meist in Grundwassermessstellen (GWM) oder mit Tensiometern gemessen und ist bei Vorhandensein von geschlossenen Grundwasservorkommen recht zuverlässig ausführbar. Bei der Ermittlung von temporären Schichtwasservorkommen sind jedoch Höhenlage und Mächtigkeit des Schichtwasservorkommens unbekannt. Als Alternative zu direkten Messungen des Wassers können indirekte Messverfahren mit Feuchtemesssensoren eingesetzt werden, die nicht das Wasser selbst, sondern vom Wasser abhängige Substanzeigenschaften messen. Hierbei können sechs verschiedene Verfahren unterteilt werden: elektrisch, thermisch, radiometrisch, hygrometrisch, optisch und akustisch. Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen gemessenem Signal und dem Wassergehalt herstellen zu können, erfordern indirekte Messverfahren eine Kalibrierung. Feuchtemessungen können in teilgesättigten bis gesättigten Medien eingesetzt werden und können somit temporär auftretendes Grundwasser grundsätzlich detektieren. Es kann dabei unter Zuhilfenahme einer bodenspezifischen Kalibrierung der Sättigungsgrad bestimmt werden.

Insbesondere geeignet scheinen Verfahren zu sein, die mit einer Kette von Sensoren arbeiten, sodass ein Tiefenprofil gemessen werden kann und mit dem sich dann auch die Lage einer temporär wasserführenden Schicht bestimmen lässt. Für die Untersuchungen wurde eine Einstichsonde nach dem Mikrowellenmessprinzip (elektrisches Verfahren) verwendet. Um die grundlegende Funktionsweise und Reproduzierbarkeit des Mikrowellen-Verfahrens in Böden zu prüfen, wurden zunächst Laborversuche durchgeführt. Hierzu wurde der Mikrowellen-Feuchtesensor in mit Boden gefüllten Zylindern unterschiedlicher Wassergehalte eingebaut. Mit den Versuchen sollte festgestellt werden, in welchen Wassergehaltsbereichen eine hinreichend genaue Detektion möglich ist und welche weiteren Randbedingungen bei dem Einsatz der Mikrowellensonde zu beachten sind. Außerdem wurde die Messsonde in einem Technikumsversuch in Bezug auf Praxistauglichkeit untersucht.

Aus der Vielzahl der durchgeführten Laborversuche mit der Mikrowellensonde konnten für die Messungen in Böden und für die Anwendung in den Technikumsversuchen folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Es ist eine Kalibrierung der Sonde an dem zu untersuchenden Bodenmaterial notwendig.
- Zum Erkennen von Schichtgliedern mit unterschiedlichem Wassergehalt sind Mindestdicken der jeweiligen Schicht von ca. 10 cm notwendig.
- Die Messsonde muss einen Mindestabstand zu freien Oberflächen von > 10 cm aufweisen.

4 Technikumsversuch

In einer Versuchsanlage wurden maßstäblich verkleinerte Böschungen (Maßstab ca. 1:5 bis 1:10 gegenüber realen

Böschungen) mit Böden verschiedener Durchlässigkeiten und einer Neigung von 1:1,5 aufgebaut, mit definierten Niederschlägen/Beregnungsmengen über eine bestimmte Zeit beaufschlagt, beobachtet und die Ergebnisse dokumentiert und ausgewertet. Der Böschungskörper besteht überwiegend aus bindigem Material, in dem eine Sandschicht eingelagert ist. Ziel war es insbesondere, Mechanismen zu untersuchen, die beim Auftreten von Schichtwässern entstehen. Zusätzlich wurden zur Erfassung des Wasserdrucks sowohl Porenwasserdruckgeber als auch die Mikrowellensonde als alternatives Messverfahren in die Böschung eingebaut. Diese Messwerte wurden ebenfalls erfasst und ausgewertet. Nach erfolgter Versuchsdurchführung wurden Proben aus dem Böschungsaufbau entnommen und im bodenmechanischen Labor untersucht. In dem nachfolgenden Bild 2 ist ein exemplarischer Aufbau eines solchen Technikumsversuchs dargestellt.

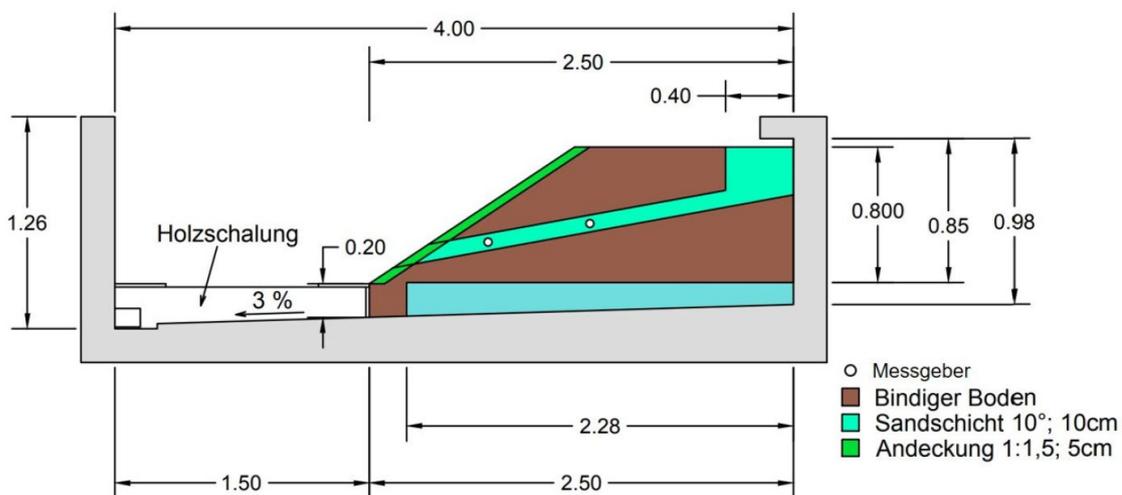


Bild 2: Technikumsversuch, Schnitt durch das Lysimeterbecken und den Versuchsaufbau

Entsprechend des Versuchskonzepts wurde die durchlässige Sandschicht durch die Zugabe von Wasser bewässert. Mit dieser Wasserzugabe wurde ein Regenereignis simuliert, bei dem eine potenziell wasserführende Schicht mit temporärem Schichtwasser beaufschlagt wird. Das zu versickernde Wasser wurde auf eine große Anzahl an Endtropfern mit regelbarem Ausfluss verteilt. Zudem wurde die Gesamtmenge mit einem Durchflussmessgerät erfasst.

5 Folgerungen

Die Berechnungen haben gezeigt, dass eine Durchströmung von Teilbereichen beziehungsweise einzelner Schichten einer Böschung nur zu einer mäßigen Erhöhung der Ausnutzungsgrade beim Standsicherheitsnachweis führt. Eine Durchströmung wasserführender Schichten allein beziehungsweise ohne weitere Effekte ist i.A. nicht versagensauslösend. Ebenso haben geringfügige Abminderungen der Scherparameter nur einen eher mäßigen Einfluss auf die Standsicherheit, erst bei recht großen Abminderungen der Scherparameter ist ein deutlicher Einfluss

feststellbar. Aus den parallel durchgeführten Laborversuchen zur Scherfestigkeit ist erkennbar, dass erhebliche Änderungen der Scherparameter erst bei relativ großen Änderungen des Wassergehalts beziehungsweise der Konsistenz auftreten.

Zu einem deutlichen Einfluss auf die Standsicherheit kommt es jedoch bei einem Aufstau von Schichtwasser in einzelnen Horizonten. Dieser Effekt verstärkt sich noch, wenn es aufgrund von Durchnässungen und damit einhergehenden Aufweichungen zu einer Abnahme von Scherparametern kommt.

Anhand der für das Forschungsvorhaben ausgewählten Projekte ist festzustellen, dass zur Beschreibung größerer Schichtpakete die Begrifflichkeit "Wechselagerung" nicht ausreichend erscheint. Sofern der feingliedrige Aufbau der einzelnen Schichtglieder beziehungsweise deren Erstreckung und Neigung betrachtet wird, konnte bei einigen Projekten eine Wasserführung auf bindigen Schichtgliedern sowie korrespondierende Wasseraustritte aus der Böschung in Zusammenhang gebracht werden. Insofern konnten die bereits aus der Schadensanalyse und den orientierenden Berechnungen beschriebenen

Schadensursachen teilweise durch die im Rahmen des Forschungsvorhabens ausgewählten Projekte bestätigt werden.

Die durchgeführten Technikumsversuche sowie die dazu ausgeführten numerischen Simulationen bestätigen ebenfalls die bereits gewonnenen Erkenntnisse. So konnte infolge eines simulierten Aufstaus in einer Schicht und des damit ausgelösten relativ hohen Drucks auf die Andeckung, stellenweise eine erhebliche Durchfeuchtung mit Anzeichen eines beginnenden Böschungsversagens festgestellt werden. Ferner konnten auch Effekte wie Ausschwemmung beziehungsweise Erosion bei entsprechend hohen hydraulischen Gradienten festgestellt werden. Die Veränderung des Wassergehalts und damit auch der Scherparameter in bindigen und an wasserführende Schichten angrenzenden Böden konnte sowohl in Labor- wie Technikumsversuchen bestätigt werden. Dies bestätigt qualitativ die vermuteten Mechanismen im Hinblick auf das Strömungsverhalten und deren Auswirkungen.

Mit den numerischen Strömungs- und Standsicherheitsberechnungen konnte ein Versagensmechanismus nachgewiesen werden, der mit den Schichtwasservorkommen im Zusammenhang steht. Mit den Berechnungen konnte ein sich an die wasserführende Sandschicht einordnender Versagensmechanismus eindeutig nachgebildet werden. Mit der numerischen Strömungsberechnung in Kombination mit einer konventionellen Standsicherheitsberechnung steht damit ein wirkungsvolles Werkzeug zur Prognose von Standsicherheitsdefiziten unter Berücksichtigung von Schichtwasservorkommen zur Verfügung.

Der Einsatz von Mikrowellensonden im Rahmen von Baugrunderkundungen erscheint derzeit aufgrund der Konfiguration des Messaufbaus und notwendiger Modifikationen nur eingeschränkt möglich. Das Verfahren weist jedoch ein großes Potenzial für die Detektion von Wassergehaltsänderungen im Baugrund auf. Sofern die Messtechnik aber für den Einsatz im Rahmen von Baugrunderkundungen weiterentwickelt wird, wären Indexmessungen beziehungsweise Zeitreihen mit der Entwicklung des Wassergehalts gut realisierbar und könnten Hinweise auf zeitweise wasserführende Schichten liefern. Besonders geeignet für die Messung im Baugrund ist dabei eine Kettenmesssonde anzusehen.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse konnten einige Aspekte herausgearbeitet werden, die sowohl bei der Vorbereitung und Ausführung einer Baugrunderkundung als auch für die Planung zu beachten sind, um mögliche Schichtwasserhorizonte im Bereich von geplanten Einschnittböschungen besser erfassen zu können.