

Konzept zur Sicherung rutschgefährdeter Oberflächen von Böschungen – erste Lösungsansätze und Modellversuche

Komplexní sledování geotechnických a pedologických aspektů při plánování kvalifikovaných rekultivačních vrstev

S. Al-Akel¹, J. Engel¹, E. Kammel²,

Abstract: Deponien sind im Sinne der Bautechnik Erdbauwerke, deren Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit rechnerisch nachzuweisen ist. Die oberste Schicht vieler Erdbauwerke besteht aus rekultivierungsfähigem Material mit ausreichend großem Porenraum und Wasserspeichervermögen. Infolge starker Durchfeuchtung können bei geneigten Oberflächen und fehlender Stabilisierung durch Wurzeln Rutschungen auftreten. Diese sind in letzter Zeit an vielen Verkehrsdämmen festzustellen, treten aber auch bei Deponieböschungen, Deichen und anderen Erdbauwerken auf. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse erster Modellversuche zur Entwicklung eines Stabilisierungsverfahrens vorgestellt, mit dem instabile, bereits geschädigte Oberflächen von Böschungen gesichert werden können.

Es wird hier ein Konzept verfolgt, das die Verbesserung der Eigenschaften der obersten Schicht von Böschungen zum Ziel hat. Der Schwerpunkt liegt zunächst auf der Untersuchung der Schadensverläufe als Grundlage für die Entwicklung von Berechnungsalgorithmen.

Abstrakt: Vývoj komplexních koncepcí pro stanovení a konstrukci izolačních rekultivačních vrstev, často označovaných jako vodonosná vrstva, vyžaduje jednotné sledování půdně mechanických, pedologických a geohydraulických požadavků.

Dosud byly základem pro stanovení minerálních vrstev převážně půdně mechanické a půdně technické požadavky. Koncepce rekultivačních vrstev zohledňuje především pedologické a geohydraulické požadavky. V rámci realizace výzkumného projektu budou zpracována pravidla pro stanovení kvalifikovaných rekultivačních vrstev. Součástí koncepce stanovení jsou kritéria a hodnoty, která zajišťují optimální metodu zabudování. Příspěvek poskytuje první přehled o vývoji technologie. Jsou představeny cesty k číselné předpovědi vlastností. Těžištěm je využití jednoduchých rámců pro optimalizaci časové a nákladové intensity rozsahu výzkumu.

1. Einführung

1.1 Anforderungen an Erdbauwerke

Erdbauwerke stellen einen erheblichen Eingriff in die Umwelt dar. Insbesondere bei Dämmen sind die Querschnittsgestaltung, die Geometrie und die Wahl der Baumaterialien abhängig von der Funktion, die der Damm zu erfüllen hat.

Es sind z. B. die folgenden Arten zu unterscheiden:

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Tel.: +49 (351) 462 2352, E-Mail: engel@htw-dresden.de, al-akel@htw-dresden.de

² Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT) an der HTW Dresden, Tel.: +49 (351) 462 3667, E-Mail: kammel@htw-dresden.de

- Verkehrsdämme: müssen im Wesentlichen vertikale Verkehrslasten aufnehmen und verformungsarm abtragen
- Deiche: sollen bei Hochwasserereignissen das Binnenland schützen, den horizontalen Wasserdruck aufnehmen und das Sickerwasser in den Untergrund ableiten. In der Zeit zwischen Hochwassersituationen sollen sie landwirtschaftlich oder für andere Zwecke nutzbar sein.
- Staudämme: müssen dauerhaft eine dichtende Funktion erfüllen und die statische Belastung infolge des Wasserdrucks aufnehmen.
- Deponieböschungen: sind Teil der Deponieabdeckung und erfüllen eine dichtende Funktion. Sie sind nach Ende der Beobachtungsphase Teil der Natur und werden dann nicht mehr als Ingenieurbauwerke behandelt.

Die Oberfläche der Erdbauwerke ist neben den von der Funktion abhängigen Beanspruchungen auch den witterungsbedingten Einwirkungen ausgesetzt. Da Erdbauwerke ein wesentlicher Teil der Umwelt sind, werden sie meist planmäßig mit rekultivierungsfähigem Boden abgedeckt oder es kommt im Laufe der Zeit zu einem spontanen Bewuchs.

Frost-Tau-Wechsel führen zur Auflockerung der obersten Schichten, Tauperioden und starke Niederschläge zur Sättigung. Im Ergebnis können Beanspruchungen entstehen, für die das Erdbauwerk ursprünglich nicht bemessen worden ist. In letzter Zeit häufen sich oberflächliche Rutschungen an Verkehrsdämmen, Lärmschutzwällen und teilweise auch an Deichen. Ursachen sind die unzureichende Festigkeit des Bodens in Verbindung mit fehlender Stabilisierung durch Bewuchs und unplanmäßige hydraulische Beanspruchungen durch abströmendes Wasser. Ausgangspunkt für die meisten Schadensereignisse sind oft zunächst lokal begrenzte Schädigungen, z. B. Erosionsrinnen.

1.2 Berechnungsverfahren, geotechnische Grundlagen

Für den Nachweis der Standsicherheit von Erdbauwerken werden Szenarien zugrunde gelegt, die aus der Beobachtung und Auswertung von Schadensfällen abgeleitet worden sind. Bezogen auf die Standsicherheit von Böschungen unterscheidet man:

- Gleitrutschungen, die durch die Entstehung von geometrisch begrenzten Bruchkörpern gekennzeichnet sind,
- Kriechrutschungen, verbunden mit sehr langsamen, hangabwärts gerichteten Bewegungen und
- das Setzungsfließen, für das der plötzliche Zusammenbruch des Korngerüsts und die Verflüssigung weiter Bereiche des Untergrunds typisch sind.

Für die unterschiedlichen Versagensarten stehen bodenmechanische Nachweise zur Verfügung, die die besonderen Randbedingungen berücksichtigen. Im Folgenden beschränken sich die Ausführungen auf Gleitrutschungen.

Abbildung 1 zeigt eine Böschungsrutschung an einem Lärmschutzdamm entlang der Bundesautobahn BAB A17 zwischen Dresden und Heidenau. Typisch für diese Art der Gleit-rutschung ist die Ausbildung von Bruchschollen. Diese werden für die rechnerischen Nachweise als starre Körper betrachtet, die durch destabilisierende Kräfte hangabwärts bewegt werden.



Abbildung 1: Böschungsruftung an der BAB A17

Für den einfachen Fall einer ebenen Gleitfläche sind die Verhältnisse in Abbildung 2 dargestellt. Auf den grau hinterlegten Bruchkörper wirkt die Kraft T_{vorh} in der unter dem Winkel ϑ geneigten Gleitfläche als hangabwärts gerichtete Beanspruchung. Der Widerstand R_T ergibt sich aus dem Reibungswinkel φ und der Kohäsion c und begrenzt damit die mögliche aufnehmbare Kraft $T_{\text{mögl}}$.

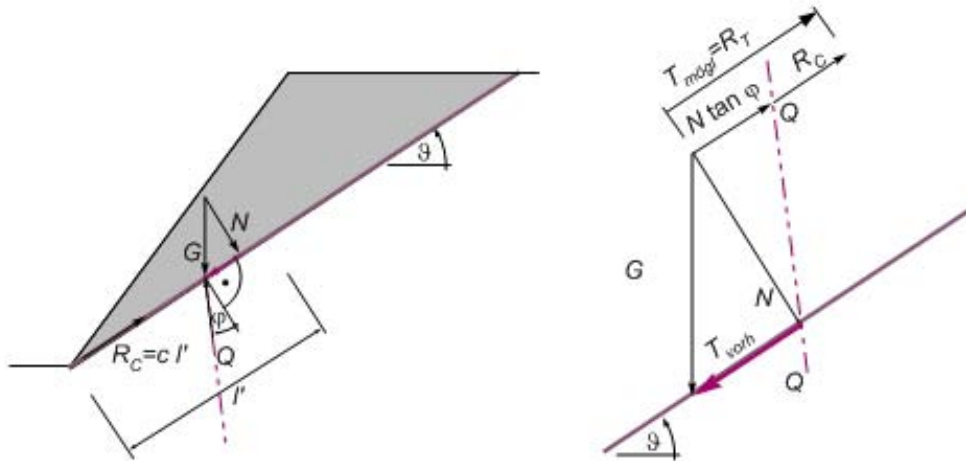


Abbildung 2: Kräftegleichgewicht bei ebenen Gleitflächen

Die maßgebende Gleitflächenform hängt von den Eigenschaften des Bodens und der Beanspruchung ab. Abbildung 3 zeigt schematisch eine Böschungsruftung mit gekrümmter Gleitflächenform. Bei homogenen, bindigen Böden liefert die Idealisierung der Bruchkörper mit Kreisgleitflächen einen realistischen Rechenansatz.

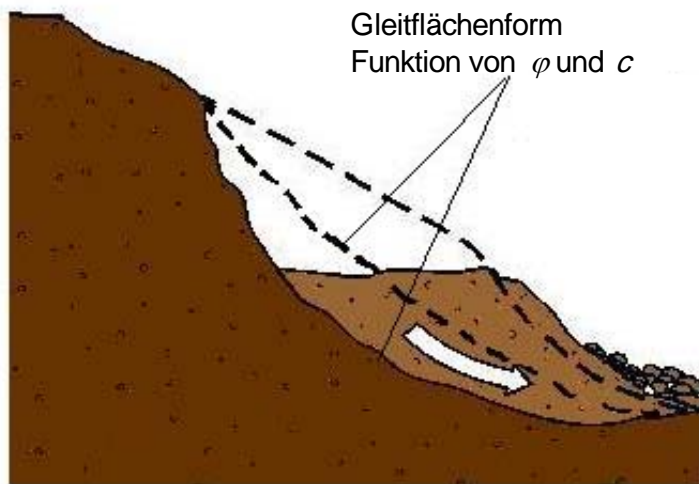


Abbildung 3: Rutschkörper und Gleitflächenform bei Gleitrutschungen

Für die rechnerische Nachweise existieren unterschiedliche Methoden (siehe DIN 4084 [2]). Sehr verbreitet ist die Untersuchung von Kreisgleitflächen, zum Beispiel mit dem in Abbildung 4 schematisch dargestellten Lamellenverfahren.

Alle klassischen bodenmechanischen Berechnungsmodelle setzen im Untergrund ein verhältnismäßig tief unter der Oberfläche liegende Bruchfläche voraus. Die Kräfte, die nicht durch Reibung und Kohäsion in dieser Gleitfläche aufgenommen werden können, müssen durch Stabilisierungselemente abgetragen werden. Eine Stabilisierung rutschgefährdeter Bereiche erfordert auf Grundlage dieser Überlegungen Anker oder Nägel, die die Defizitkräfte unterhalb der Gleitfläche in den Untergrund abtragen. Daraus ergeben sich die i. d. R. großen Abmessungen dieser Bauelemente.

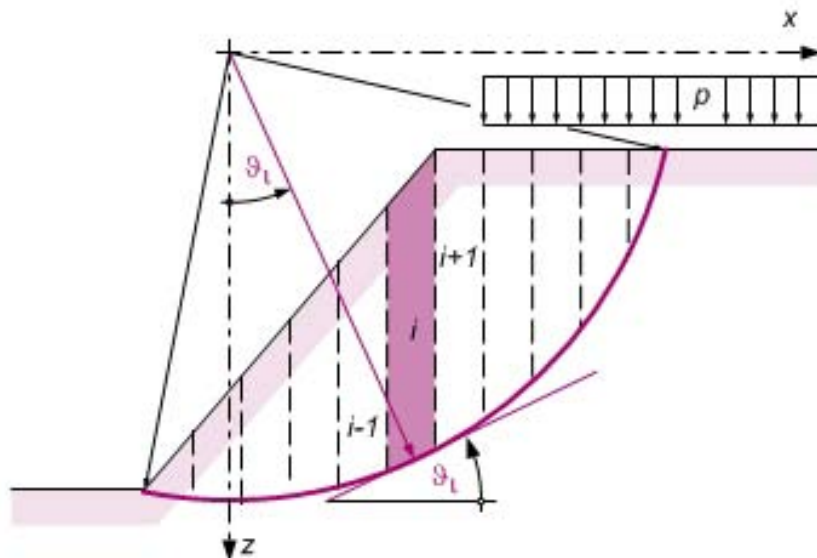


Abbildung 4: Einteilung von Kreisgleitflächen mit Lamellen

Für einfache Fälle dürfen zur Abschätzung der Standsicherheit von Böschungen Nomogramme benutzt werden. In Abbildung 5 ist das Nomogramm von Taylor [3] dargestellt, mit dem die Standsicherheit bei homogenem Boden und unter Annahme von Kreisgleitflächen beurteilt werden kann.

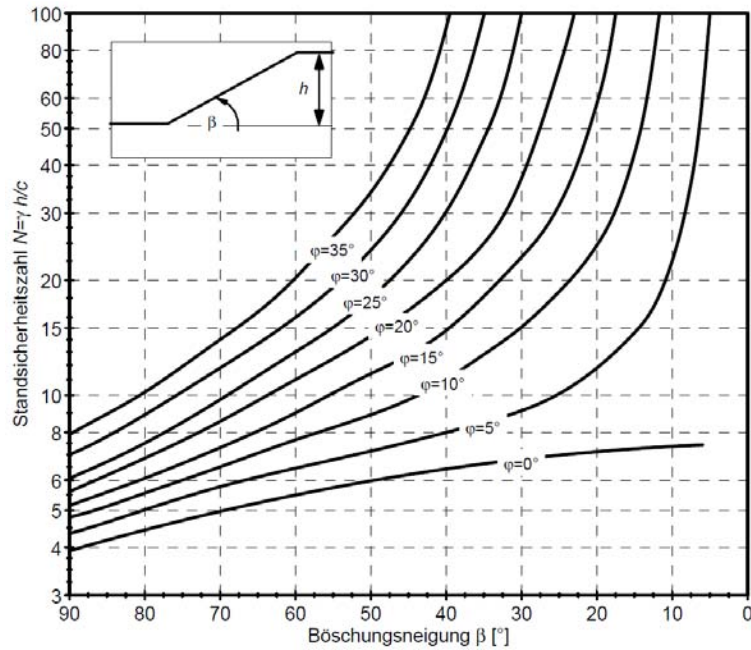


Abbildung 5: Nomogramm nach Taylor für die Bewertung der Böschungstabilität

2 Schadensfälle und Sanierungsverfahren

2.1 Rutschungen

Nach Starkregenereignissen sind immer wieder an Lärmschutzböschungen neben Autobahnstrecken Rutschungen festzustellen. Diese treten vermehrt im Frühjahr auf, nach der Tauperiode. In Abbildung 6 sind Beispiele dafür dargestellt.



Abbildung 6: Böschungsrutschungen an Lärmschutzdämmen neben der Bundesautobahn

Der Boden ist nahe der Oberfläche aufgelockert, mit Wasser gesättigt und dadurch wenig tragfähig. Häufig fehlt die Stabilisierung durch Pflanzenwurzeln oder ist noch nicht voll wirksam.

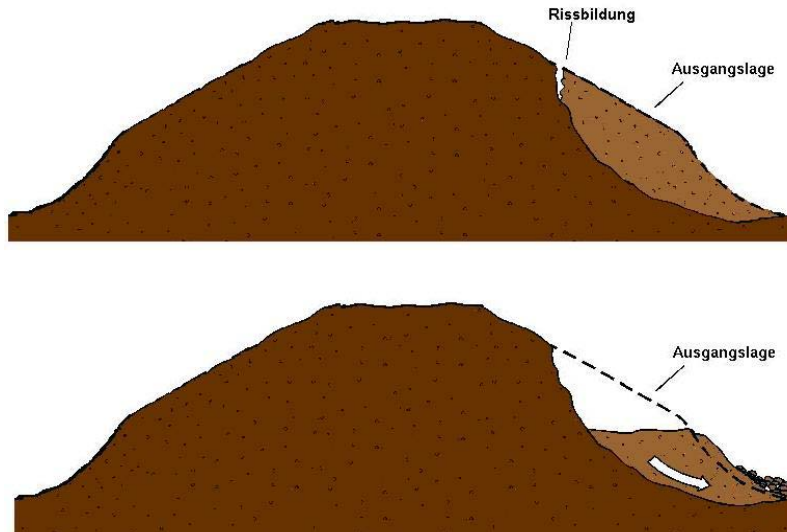


Abbildung 7: Allmähliche Schadensentwicklung bei Böschungsrutschungen

Meist entstehen diese Rutschungen im Ergebnis eines länger andauernden Prozesses. Zunächst bilden sich infolge von Erosionsvorgängen oder inhomogenem Bodeneinbau Schwächezonen, die sich im Laufe der Zeit durch die Wirkung von Wasser, Frost- und Tauwechsel sowie Austrocknungserscheinungen vertiefen. Aus den anfänglichen „Hautrutschungen“ können im Laufe der Zeit tieferreichende Hangrutschungen entstehen.

2.2 Sanierungsmöglichkeiten

Auf Grundlage der Bruchmodelle der klassischen Bodenmechanik wird bei der Sanierung von Rutschungen die Stabilisierung des Erdbauwerks bis in eine Tiefe angestrebt, die die potentielle oder bereits vorhandene Gleitfläche mit einschließt.



Abbildung 8: Sanierung von Rutschungen, links: kompletter Neuaufbau, rechts: Grobschlag

Verbreitete Sanierungsmethoden sind das Einrütteln von Grobschlag in geschädigte Böschungsbereiche oder der komplette Neubau einzelner Abschnitte. Bei der Wiedererrichtung wird i. Allg. mehr Wert auf die Einhaltung der Verdichtungsanforderungen gelegt. In vielen Fällen werden zusätzliche, stabilisierende Elemente mit dem Erdbauwerk kombiniert, z. B. Stützkonstruktionen oder Verbundbauweisen (geokunststoffbewehrte Erde usw.). Verfahren für die flächendeckende Lösung des Problems fehlen.

Bei der in Abbildung 9 dargestellte Oberflächenicherung von Böschungen mit einem vernagelten Geokunststoff werden die Defizitkräfte, die beim Versagen der Böschung mobilisiert werden, vom Geokunststoff aufgenommen und auf die Erdnägel übertragen. Diese leiten die Kräfte wiederum in den Bereich des Bodens unterhalb der Bruchzone ab. Maßgebend für die Bemessung ist der Herausziehwiderstand der Nägel.

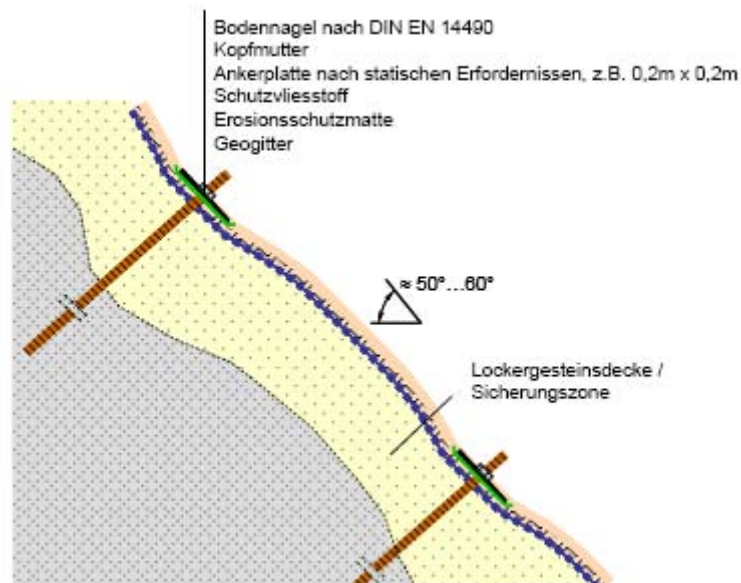


Abbildung 9: Geokunststoffabdeckung in Kombination mit einer Vernagelung [4]

2.3 Offene Probleme

Die klassischen Verfahren des Grund-, Erd- und Dammbaus basieren auf Überlegungen zu typischen Versagensmechanismen. Bei der Untersuchung des Grenzzustands der Tragfähigkeit wird das Kräftegleichgewicht an möglichen Bruchkörpern betrachtet und der Widerstand mit der maßgebenden Beanspruchung verglichen. Aus diesem Vergleich folgt eine Defizitkraft, die durch eine konstruktive Verstärkung oder durch die Erhöhung des Bodenwiderstands aufgenommen werden muss. Dieses Konzept hat folgende Auswirkungen bezüglich der Bewertung und Sanierung von oberflächennahen Hangrutschungen („Hautrutschung“):

- Der Einfluss von lokal begrenzten Störungen oder Erosionsvorgängen wird nicht berücksichtigt. Es wird von einem vollständig ausgebildeten Bruchkörper ausgegangen der durch zusätzliche Widerstände oder Rückhaltekräfte stabilisiert werden muss.
- Die zeitliche Entwicklung der Schädigung lässt sich nicht erfassen. Eine Möglichkeit zur Verlangsamung oder vollständigen Beendigung dieser Prozesse kann dadurch nicht erkannt werden.
- Es ist nicht möglich, die Restfestigkeit von bereits gerutschten Bereichen für die Sanierung zu nutzen.
- Die Oberfläche von Böschungen wird nicht oder nur in sehr geringem Maße für die Stabilisierung mit herangezogen. Der überwiegende Anteil der Widerstände wird rechnerisch im Bereich der Gleitfläche oder darunter angesetzt.

3 Entwicklung eines neuen Stabilisierungsverfahrens

3.1 Konzept der stabilisierenden Böschungshaut

Bei der Begutachtung von Böschungsruutschungen an Deichen und Lärmschutzdämmen wurde mehrfach festgestellt, dass die Art der Oberflächenbefestigung einen Einfluss auf den Schadensverlauf hat. So verbessert eine dichte Grasnabe bei Deichen die Erosionsstabilität und verringert die Durchlässigkeit auf der Wasserseite. Wurzeln können den Boden stabilisieren, nach dem Absterben der Pflanzen aber auch Ursache für Strömungskanäle sein und Erosion sein. An vielen Böschungen ist der günstige Einfluss von Bewuchs an überwucherten Rutschkanten zu erkennen.

Aus diesen Überlegungen ist die Idee entstanden, als stabilisierendes Element die Außenhaut von Böschungen näher zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt zunächst auf folgenden Bereichen:

- Nachweis der stabilisierende Wirkung einer verfestigenden Außenhaut durch Modellversuche
- Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Berechnung der Kräfte in der Außenhaut unter Nutzung klassischer Bemessungsverfahren
- Untersuchung von Selbstheilungseffekten bei geschädigten und mit einer stabilisierenden Außenhaut ertüchtigten Böschungen.

Zur grundsätzlichen Überprüfung dieses Ansatzes sind kleinmaßstäbliche Modellversuche im Geotechnik Labor des Fachgebiets Geotechnik Dresden durchgeführt worden.

3.2 Modellversuche

Für 1g Modellversuche wurde ein trockener, enggestufter Sand verwendet. Der Modellsand ist nach DIN EN ISO 14688 als feinkiesiger mittelsandiger Grobsand (fgmsaCSa) zu benennen.

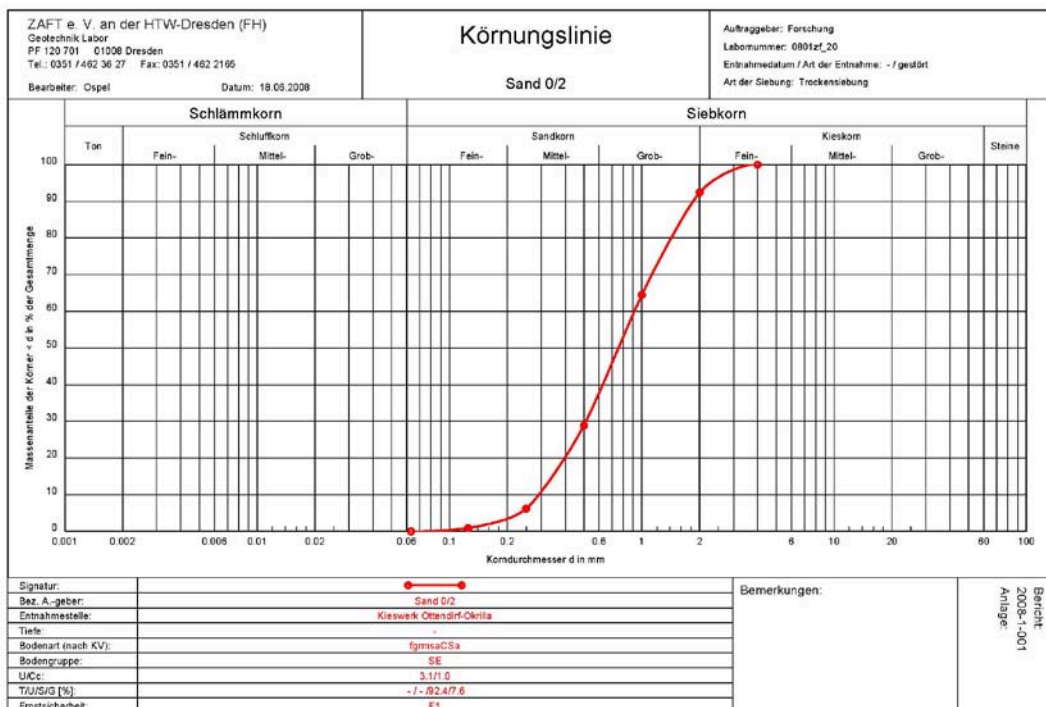


Abbildung 10: Korngrößenverteilung des Modellsandes

Die bodenmechanischen Kennwerte des verwendeten Bodens sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Scherparameter wurden im Rahmenschergerät ermittelt.

Tabelle 1: Mittler Kennwerte des Modellsands

Bodenart	Bodengruppe nach DIN 18196	Benennung nach Kornverteilung	Wichte γ [kN/m ³]	Scherparameter	
				φ' [°]	c [kN/m ²]
Modellsand	SE	fgrmsaCsa	15,1	34,9	4,0

In ersten Tastversuchen wurde die Abhängigkeit des Reibungswinkels φ' von der Lagerungsdichte untersucht. Dafür ist trockener Sand in ein kleines Aquarium eingefüllt worden. Abbildung 11 zeigt den Versuchsaufbau. Bei mitteldichter Lagerung ergab sich z. B. ein Reibungswinkel von ca. 36,5°.

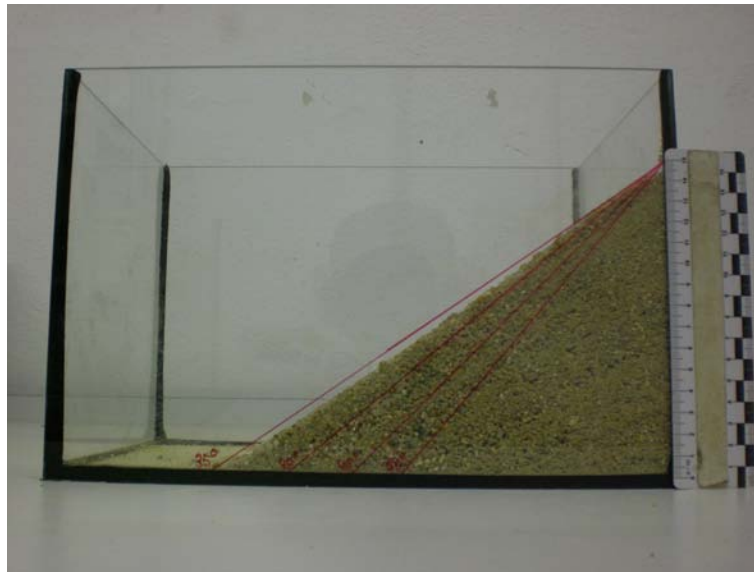


Abbildung 11: Bestimmung des Schüttwinkels in Abhängigkeit der Lagerungsdichte

Durch Einbau von feuchtem Sand konnten bei deutlich geringerer Lagerungsdichte Böschungsneigungen bis $\beta=45^\circ$ erzielt werden. Nach Herstellung der Ausgangsgeometrie des Damms im Modell wurde dieser vorsichtig von einer Seite unter Wasser gesetzt. Bei den Versuchen mit sehr lockerer Lagerung kam es infolge von Sackungen zum vollständigen Versagen, während bei etwas dichterer Lagerung die Ausbildung von Rissen beobachtet werden konnte, ohne dass der Damm vollständig versagte.

Zum Nachweis der Wirksamkeit der Außenhaut sind die Versuche, bei denen der Damm vollständig versagte, mit Außenhautabdeckung wiederholt worden und bei den Versuchen mit sich ankündigenden Brucherscheinungen wurde die Böschungshaut während des Versuchs aufgebracht. In beiden Fällen konnte das fortschreitende Versagen verhindert werden. Dabei ist die Wirkung einer stabilisierenden Außenhaut durch eine dünne, grobmaschige Gaze simuliert worden. Zur Modellierung kurzer Nägel wurden Holzzahnstocher verwendet.

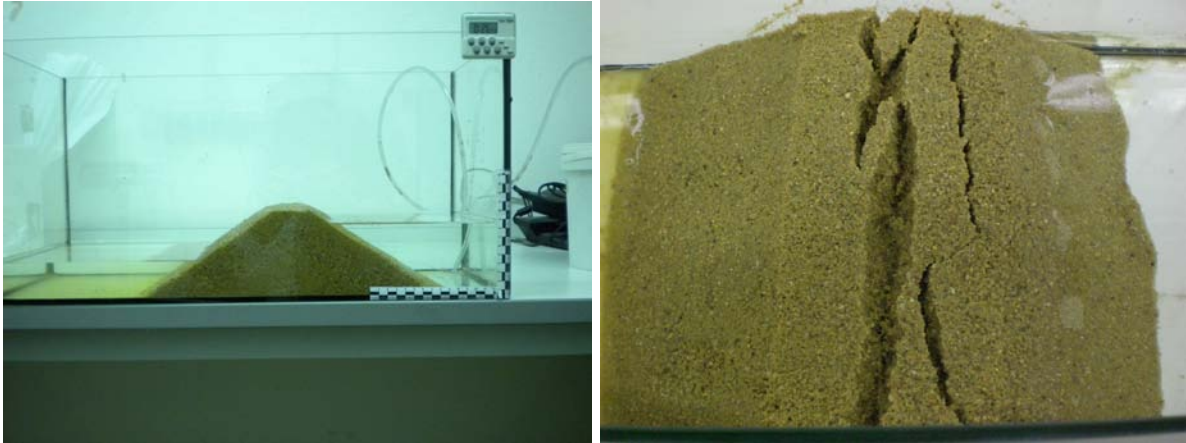


Abbildung 12: Durchsickerung eines Dammquerschnitts im Modellversuch

Im Ergebnis der Versuche konnte die grundsätzliche Eignung einer Stabilisierung durch eine zugfeste Außenhaut nachgewiesen werden. Diese Methode könnte auch geeignet sein, um bereits geschädigte Böschungen zu sichern und die Stabilisierung durch Selbstheilungseffekte und Bewuchs zu ermöglichen.

Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Grundlagen für Verfahren auf Basis dieses Konzepts bereitzustellen. Dabei stehen die Restfestigkeit der geschädigten Böschung sowie die Verbundwirkung der Außenhaut im Mittelpunkt.



Abbildung 13: Gleitfugen und Stabilisierung mittels Böschungshaut im Modellversuch

4 Schlussfolgerungen, Ausblick

Böschungen stellen spezielle Anforderungen an die Eigenschaften des Bodens. Für die Entwicklung geeigneter Bemessungsverfahren sind geotechnische, bodenkundliche und agrartechnische Ansätze zu kombinieren. Es werden technische Lösungen benötigt, die die Bedingungen am jeweiligen Standort berücksichtigen und eine lange Funktionsfähigkeit garantieren.

Nach den Ergebnissen erster Modellversuche wird an der Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von stabilisierenden Außenhautvarianten gearbeitet. Dies umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Entwicklung von Verfahren zur zahlenmäßigen Erfassung der Restfestigkeit von geschädigten Böschungsbereichen. Dazu gehört die experimentelle Feststellung der Bodenkennwerte im Versagenszustand unter Berücksichtigung des Wasserhaushalts und des Bewuchses und die Bewertung des Standsicherheitsniveaus durch rechnerische Untersuchungen
- Untersuchung von Technologien zur Herstellung einer zugfesten Außenhaut. Es ist die Berücksichtigung von biologischen Bauweisen ebenso vorgesehen wie der Einsatz von Bewehrungen, z. B. durch Geokunststoffe.
- Entwicklung von Bemessungsansätzen. Geplant ist neben klassische Bruchmechanismen auch Ansätze zu untersuchen, die von einer Bodenverbesserung und damit verbundenen günstigeren Kennwerten ausgehen.

Die Untersuchungen sind im Modellmaßstab geplant, sollen aber abschließend unter realen Bedingungen getestet werden. Ziel ist es, wirtschaftliche Alternativen zu den klassischen Verfahren des Erd- und Grundbaus bereitzustellen, mit denen die flächendeckende Sicherung von Erdbauwerken möglich wird.

Schrifttum

- [1] Bodenkundliche Kartieranleitung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Ad-hoc-AG Boden, 5. Aufl. Hannover 2005
- [2] DIN 4084, Baugrund – Geländebruchberechnungen 2009
- [3] D.W. Taylor. Fundamentals of soil mechanics. J. Wiley and Sons, 1948
- [4] A. Herold, L. Vollmert, „Kombination von Vernagelung und Geokunststoffen zur Sicherung von Lockergesteinsböschungen“ Bautechnik 85 Heft 6, 2008
- [5] Engel, J. und Lauer, C.: Einführung in Boden- und Felsmechanik, Fachbuchverlag Leipzig 2010