

# ÜBERSTRÖMBARE DÄMME DURCH BODENSTABILISIERUNG

## Verfasser:

Dipl.-Ing. Bernd Zweschper, Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik

1.	Allgemeines / Einsatzmöglichkeiten .....	1
1.1.	Bodenstabilisierung.....	1
1.2.	Anwendung bei überströmbaren Dämmen.....	1
1.3.	Bauweise .....	2
1.4.	Abgrenzung des Anwendungsbereichs.....	3
2.	Anforderungen / Materialauswahl .....	3
2.1.	Bindige Bodenarten als Dammbaustoff.....	4
2.2.	Bindemittel und deren Wirkungsweise.....	4
2.2.1.	Kalk .....	4
2.2.2.	Zement.....	5
3.	Eignungsuntersuchungen.....	5
3.1.	Frostbeständigkeitskriterien .....	6
3.2.	Frost-Tauwechselprüfung .....	6
4.	Herstellung, Reparatur und Sanierung.....	7
5.	Zusammenfassung .....	7

## 1. Allgemeines / Einsatzmöglichkeiten

### 1.1. Bodenstabilisierung

In der Geotechnik kennt man verschiedene Verfahren, mit denen die physikalischen Eigenschaften von Böden im Hinblick auf die anwendungsspezifischen Anforderungen positiv beeinflusst werden können. Eines dieser Verfahren, welches sich vor allem im Erd- und im Straßenbau seit langem bewährt hat, stellt die Bodenstabilisierung mit verschiedenen Bindemitteln dar. Man spricht von einer Bodenverbesserung, wenn durch das Einmischen eines Bindemittels (in diesem Fall meist Feinkalke) vorrangig das Ziel einer verbesserten Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit eines zu nassen bindigen Bodens verfolgt wird. Eine nachhaltige und dauerhafte Erhöhung der Tragfähigkeit, der Festigkeit, der Raumbeständigkeit, der Wasserunempfindlichkeit und der Frostbeständigkeit durch die Bindemittelzugabe bezeichnet man hingegen als Bodenverfestigung. Die dabei zum Einsatz kommenden Bindemittel enthalten häufig auch Zementanteile.

### 1.2. Anwendung bei überströmbaren Dämmen

Für die Anwendung der überströmbaren Dämme ist der Einsatz des Verfahrens der Bodenstabilisierung neu. Es müssen daher zunächst genaue Anforderungen definiert werden, welche den spezifischen Besonderheiten diese Anwendung Rechnung tragen. Neben den maßgebenden Einwirkungen ist dabei auch das besondere Gefahrenpotential zu berücksichtigen, welches in solchen Anlagen des Hochwasserschutzes im Versagensfall

steckt. Ob sich aus einem gewählten Boden-Bindemittelgemisch ein Baustoff herstellen lässt, der die gestellten Anforderungen erfüllt, ist in Eignungsuntersuchungen nachzuweisen. Ist dieser Nachweis erbracht und die geeignete Bindemittelart und –zugabemenge bestimmt, so kann die Herstellung des stabilisierten Bodenkörpers unter Beachtung der bekannten Regeln des Erdbaus mit gebräuchlichen Fertigungstechniken und Geräten erfolgen, was die Bodenstabilisierung auch für den hier betrachteten Anwendungsbereich der überströmbaren Dämme zu einer interessanten, weil in der Herstellung einfachen und kostengünstigen Bauweise macht.

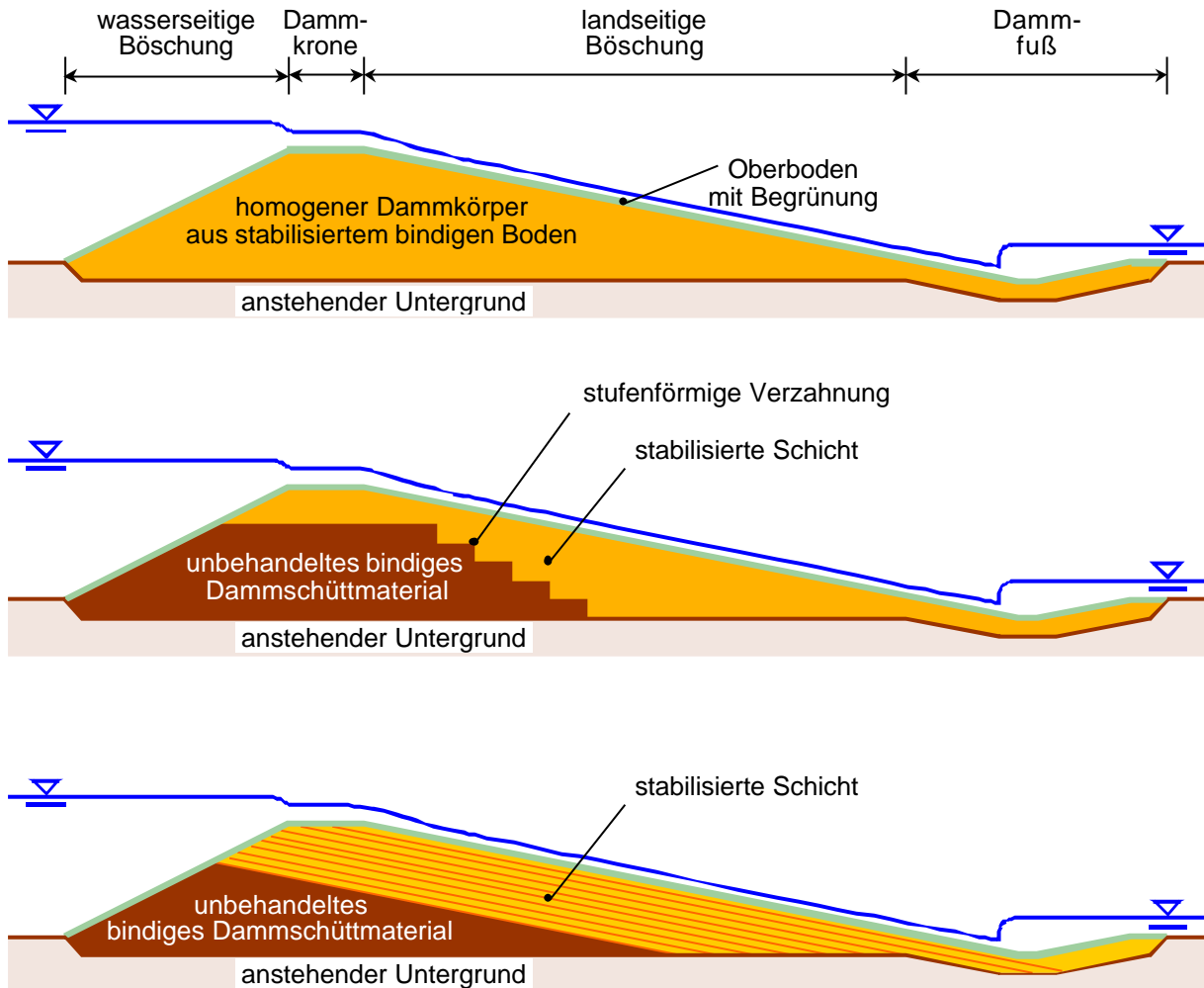


Abb. 1: Prinzipskizzen von Dammquerschnitten

### 1.3. Bauweise

Bei kleineren Dämmen mit relativ geringen Schüttmengen ist im Allgemeinen aus fertigungstechnischer Sicht die Herstellung eines homogenen Dammkörpers aus einer geeigneten Bodenstabilisierung im Baumischverfahren sinnvoll. Auf diese Weise entsteht ein monolithischer Dammkörper. Unter bestimmten Randbedingungen ist auch denkbar, lediglich auf der überströmbaren auszubildenden landseitigen Böschung eine ausreichend dicke stabilisierte Schicht aufzubringen. Diese Schicht ist dann über die Dammkronen hinweg bis zur wasserseitigen Böschung durchzuziehen. Der landseitige Böschungsfuß muss konstruktiv so gestaltet werden, dass eine einsetzende Erosion in diesem Bereich im Überströmungsfall verhindert wird. Prinzipskizzen von Dammquerschnitten sind in Abb. 1 dargestellt.

Aus Gründen der Ästhetik und der Einpassung in die Landschaft muss der Dammkörper abschließend mit einer Schicht aus Oberboden mit geeigneter Begrünung und Bepflanzung abgedeckt werden. Die Abdeckung bewirkt auch einen gewissen klimatischen Ausgleich für den Dammkörper, indem sie die Einwirkung von Austrocknung und Frost auf den stabilisierten Bodenkörper dämpfen. Im sehr seltenen Fall der Überströmung leistet die Vegetationsschicht darüber hinaus auch einen (nicht näher quantifizierbaren) Erosionsschutz, welcher bei der Bemessung allerdings nicht berücksichtigt werden darf. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Oberbodenschicht mit der Vegetation durch die bei der Überströmung angreifende hydraulische Belastung früher oder später abgetragen werden wird. Der aus stabilisiertem bindigen Boden aufgebaute Dammkörper ist dann dem erosiven Angriff der Schlepkräfte des strömenden Wassers unmittelbar ausgesetzt. Durch einen ggf. ungleichmäßigen Abtrag des Oberbodens kann es zudem zu Abflusskonzentrationen kommen. Der Dammkörper muss in der Lage sein, auch diese erhöhte Belastung schadlos ertragen zu können.

Da der Dammkörper bei dieser Bauweise eine relative glatte Oberfläche aufweist, was insbesondere für den Zustand nach dem in Kauf genommenen Abtrag der Oberbodenschicht gilt, findet auf der Böschung eine starke Beschleunigung der Strömung statt, was sich einerseits positiv auf die Abflusskapazität auswirkt, andererseits aber am Dammfuß durch die dort vorherrschenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit starken Turbulenzen die Gefahr der Kolkbildung und einer sich rückschreitend ausbreitenden Erosion erhöht. Auch im Gelände unterhalb des Dammes können durch hohen Fließgeschwindigkeiten starke Erosionserscheinungen auftreten. Beides muss durch ein entsprechend ausgebildetes Tosbecken verhindert werden, da andernfalls die Dammsicherheit massiv gefährdet ist.

Für die Dammbegrünung geeignet sind in erster Linie Gräser (Ansaat von Magerrasen, Saatmatten, Fertiggrasen). Sie ermöglichen eine einfache Dammpflege und bieten ggf. die Möglichkeit der Bewirtschaftung durch Beweidung. Bäume und Gehölze kommen hingegen als Vegetation auf überströmbaren Böschungen nicht in Frage. Sie können die Standsicherheit des Dammes gefährden und erschweren darüber hinaus den Unterhalt.

#### **1.4. Abgrenzung des Anwendungsbereichs**

Der hier betrachtete Anwendungsbereich umfasst kleinere Absperrdämme mit Höhen bis ca. fünf Metern. Bei entsprechenden Anlagen zur Hochwasserrückhaltung wird es sich in der Regel um sogenannte Trockenbecken ohne Dauerstau handeln. Ein Einstau dieser Becken erfolgt lediglich kurzzeitig bei extremen Niederschlagsereignissen. Die Gefahr einer Durchweichung des Dammkörpers ist daher als gering einzustufen.

## **2. Anforderungen / Materialauswahl**

Um eine sichere Bemessung und Auslegung eines überströmbaren Dammes zu ermöglichen, ist grundsätzlich die Kenntnis und das Verstehen der für die jeweilige Bauweise charakteristischen Versagensmechanismen unerlässlich. Für die Bodenstabilisierung ist hierbei von maßgebender Bedeutung, das Versagen infolge verschiedener Erosionserscheinungen bei Durchströmung (Suffosion, Kontakterosion, rückschreitende Erosion) und bei Überströmung (Oberflächenerosion) auszuschließen. Besondere Aufmerksamkeit ist dem Kronenbereich und dem Dammfuß zu widmen. Ein nachweislich hoher Widerstand gegen Bodenerosion, der auch unter der Einwirkung verschiedener Witterungseinflüsse dauerhaft erhalten bleibt, ist zu gewährleisten.

Das Erosionsverhalten wird hinsichtlich der Widerstände von den Materialeigenschaften der Dammbaustoffe und in Bezug auf die Einwirkungen von den Eigenschaften der Strömung beeinflusst. Die Strömungseigenschaften (Geschwindigkeit, Turbulenz) wiederum hängen vor allem von der abzuführenden Wassermenge, der Dammgeometrie und der Beschaffenheit der überströmten Fläche ab.

## 2.1. Bindige Bodenarten als Dammbaustoff

Bindige Bodenarten, die als Baustoff für überströmbare Dämme Verwendung finden sollen, müssen zunächst die allgemeinen Materialanforderungen erfüllen, welche im DVWK MERKBLATT 2002/1991 – HOCHWASSERRÜCKHALTEBECKEN genannt werden. Darüber hinaus müssen sich diese Böden grundsätzlich für eine Stabilisierung mit Bindemitteln eignen. Wichtiges Kriterium ist dabei die Kornverteilung. Abb. 2 (FLOSS 1997) zeigt Körnungsbereiche, in den sich die Kornverteilungen von Böden bewegen müssen, um grundsätzlich für eine Behandlung mit Kalk oder Zement geeignet zu sein.

Für die Eignung zu einer Bodenstabilisierung mit Feinkalk oder Kalkhydrat muss der zu behandelnde feinkörnige Boden darüber hinaus genügend reaktionsfähige Bestandteile enthalten. Unvollständig zersetzte Gesteine und organische Böden sind für eine Stabilisierung mit Bindemitteln grundsätzlich ungeeignet.

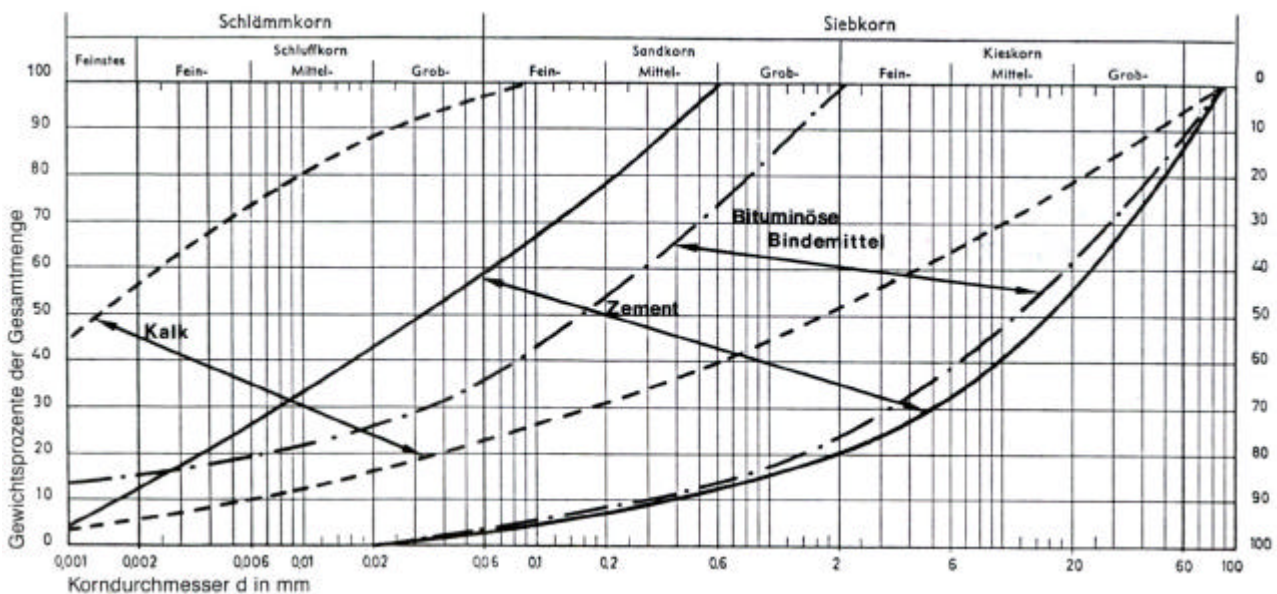


Abb. 2: Körnungsbereiche für Bodenstabilisierungen

## 2.2. Bindemittel und deren Wirkungsweise

Im Erdbau werden für die Stabilisierung von Böden verschiedene Bindemittelarten verwendet. In Abhängigkeit von der Bodenart und vom Wassergehalt kommen in erster Linie Feinkalke, Kalkhydrate, hochhydraulische Kalke und Zemente sowie zunehmend auch Mischungen aus verschiedenen Bindemitteln zum Einsatz.

### 2.2.1. Kalk

Bindiger Boden wird durch seinen Gehalt an Tonmineralen zum geeigneten Reaktionspartner für Kalke. Bei diesen Reaktionen verändern sich die Tonmineraleigenschaften und die Bodenstruktur.

Dabei wird zwischen der Sofortreaktion und der Langzeitreaktion unterschieden. Kennzeichnend für die Sofortreaktion, welche innerhalb von Minuten nach dem Einmischen einsetzt und bereits nach wenigen Tagen abgeschlossen ist, ist zunächst eine Reduzierung des Wassergehalts des Boden-Kalkgemischs. Diese hat ihre Ursachen in der chemischen Bindung von Wassermolekülen, im Verdampfen von Wasser als Folge der beim Löschen von Branntkalk freigesetzten Wärme und daneben auch in der Belüftung beim Mischvorgang. Einsetzende chemische Reaktionen in den Tonmineralen und an deren Grenzflächen führen darüber hinaus zu einer Krümelbildung. Auch eine Verbesserung der Verdichtbarkeit stellt sich schon kurze Zeit nach dem Einmischen ein. Der für die Verdichtung optimale Wassergehalt steigt bei gleichzeitig abnehmender Proctordichte. Ein gewünschter Verdichtungsgrad ist gegenüber dem unbehandelten Boden innerhalb eines größeren Wassergehaltsbereichs zu erzielen. Die Verbesserung der Plastizitätseigenschaften, eine abnehmende Empfindlichkeit gegenüber Wasser sowie die Erhöhung der Tragfähigkeit sind ebenfalls Folgen der Kalkzugabe. Die beschriebenen Effekte der Sofortreaktion macht man sich vor allem bei der Verbesserung der bautechnischen Verarbeitbarkeit zu nasser Böden zu Nutze.

Während der Langzeitreaktion kommt es zu einer chemischen Umwandlung der Tonminerale. Diese puzzolanischen Reaktionen führen im Verlauf von einigen Monaten bis zu mehreren Jahren zu Raumbeständigkeit, langfristiger Zunahme der Festigkeit und dauerhafter Tragfähigkeit. Erfahrungsgemäß ist ein starker Festigkeitsanstieg bis zu einer Abbindezeit von 2 bis 3 Jahren zu erwarten.

Im Unterschied zu den Feinkalken und den Kalkhydraten wirken hydraulische Kalke im Wesentlichen durch Reaktionen ihrer Hydraulefaktoren mit dem Wasser des Bodens verfestigend. Sie eignen sich vor allem für die Verfestigung grob- und gemischtkörniger Bodenarten, deren Wassergehalt im Bereich des optimalen Verdichtungswassergehaltes liegt.

### **2.2.2. Zement**

Bei Bodenstabilisierung mit Zement resultiert die hydraulische Verfestigung aus einem Kristallisationsvorgang. In feinkörnigen Böden werden dabei starke Bindungen zwischen den Mineralkörnern durch die Hydratation des Zements hergestellt. Es entsteht eine verkittete Matrix, welche die Bodenkörner einschließt. Die zellenförmige Struktur dieser Matrix bestimmt die Festigkeit des Endprodukts, da die Festigkeit der Tonteilchen innerhalb der Matrix verhältnismäßig gering ist. Die erzielbaren Endfestigkeiten sind größer und werden schneller erreicht als bei Kalkstabilisierungen.

Der Verarbeitungszeitraum für das Boden-Zementgemisch beträgt im Allgemeinen bei nicht hydrophobiertem Zement bis zu drei Stunden nach dem Ausstreuen, bei hydrophobiertem Zement drei Stunden nach Beginn des Mischvorgangs. Er ist damit wesentlich kürzer als bei Boden-Kalkgemischen, die auch 24 Stunden nach dem Einmischen des Bindemittels noch verarbeitet werden können. Die fertige Zementstabilisierung ist über einen Zeitraum von 7 Tagen vor Austrocknung zu schützen.

Das erforderliche gründliche und gleichmäßige Einmischen des Zements erfordert bei bindigen Böden häufig eine Vorbehandlung mit Kalk. Daher haben sich in der Praxis unter bestimmten Randbedingungen derartige Bindemittelgemische bewährt.

### 3. Eignungsuntersuchungen

Die Bodenvermittlung durch die Bindemittelzugabe erhöht den Erosionswiderstand bindiger Böden entscheidend. Dies haben großmaßstäbliche Überströmungsversuche, die an der Universität Stuttgart durchgeführt wurden, gezeigt (WESTRICH ET AL. 2003). Die Bodenstabilisierung als Baustoff für überströmbare Dämme muss aber auch nach der Einwirkung wechselnder Witterungseinflüsse wie Frost und Austrocknung im Fall der Durch- und Überströmung dauerhaft erosionsstabil bleiben.

Die genannten Witterungseinflüsse greifen die Struktur kohäsiver Böden an und erzeugt weitreichende irreversible Änderungen der Bodeneigenschaften. So entstehen beim Austrocknen Schrumpfrisse und bröckelige Strukturen, die wiederum das Eindringen von Wasser in den Boden erleichtern und dadurch zum Aufweichen und zur Entfestigung des Bodens beitragen können. Die Neigung eines bindigen Bodens zur Bildung von Schrumpfrissen bei Austrocknung wird durch die Bindemittelzugabe derart herabgesetzt, dass dieses Phänomen bei Bodenstabilisierungen im Allgemeinen in nur sehr geringem Umfang auftritt und im Bezug auf das Erosionsverhalten kein Problem darstellt. Eine Aufweichung oder Verschlämzung durch Wassereinwirkung findet bei stabilisierten bindigen Böden im Allgemeinen nicht statt.

Maßgebend ist die Frostbeständigkeit. Eine pauschale Aussage über die dafür geeignete Bindemittelart und die erforderliche Zugabemenge kann aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren auf das Frostverhalten bindiger Böden nicht gemacht werden. Aufgabe von Eignungsuntersuchungen ist es daher, die geeignete Bindemittelart und die erforderliche Zugabemenge im Einzelfall festzulegen.

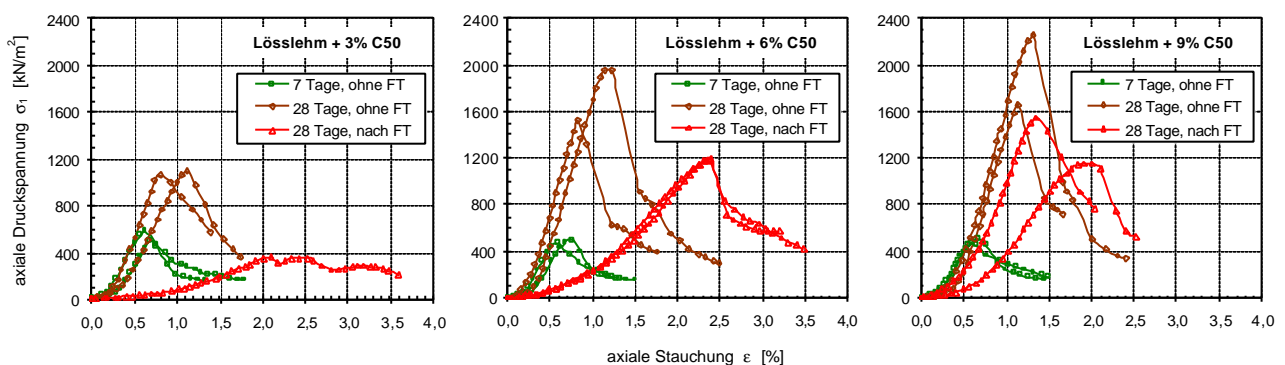


Abb. 3: Beispiel für das Ergebnis einer Frostprüfung

#### 3.1. Frostbeständigkeitskriterien

Als Kriterien für die Frostbeständigkeit werden bei den gängigen Eignungsprüfungen für Bodenstabilisierungen im Straßenbau (FGSV 591/B11 1991) Höchstwerte für Längenänderungen und Mindestwerte der einaxialen Druckfestigkeit nach der Einwirkung mehrerer Frost-Tau-Wechsel verwendet. Hinsichtlich dem Anwendungsbereich der überströmbaren Dämme können diese Eignungsprüfungen grundsätzlich auch verwendet werden. Die Frostbeständigkeitskriterien müssen allerdings angepasst werden, da die Anforderungen nicht wie im Straßenbau in erster Linie auf den dauerhaften Erhalt der Tragfähigkeit des stabilisierten Bodens zielen. Vielmehr ist hier der dauerhafte Erhalt der Erosionsstabilität bei Durch- und Überströmung maßgebend.

### **3.2. Frost-Tauwechselprüfung**

In den Prüfungen werden künstlich aus verschiedenen Boden-Bindemittelgemischen hergestellte Probekörper im Labor unter bestimmten Randbedingungen zunächst einer Beanspruchung aus wechselnder Einwirkung von Frost und Auftauen unterzogen. Im Anschluss daran wird an diesen Proben die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt. Die ermittelten Werte werden dann mit denen verglichen, die an entsprechenden Proben ermittelt wurden, welche zuvor keiner Frost-Taubeanspruchung ausgesetzt waren. Die Ergebnisse einer solchen Prüfung sind beispielhaft in Abb. 3 dargestellt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann dann die Festlegung der erforderlichen Bindemittelmenge erfolgen, die im Allgemeinen nicht kleiner als 6 Gew.-% sein wird.

## **4. Herstellung, Reparatur und Sanierung**

Neben dem Einhalten der bekannten Regeln des Dammbaus ist bei Hochwasserschutzdämmen, die durch den Einsatz einer Bodenstabilisierung überströmbare ausgebildet werden sollen, aus fertigungstechnischer Sicht das intensive Einmischen des Bindemittels sowie die ausreichende Verdichtung des Gemischs in der Nähe des optimalen Wassergehalts jeweils mit geeignetem Gerät besonders wichtig.

Entscheidenden Einfluss auf die erfolgreiche Herstellung einer frostbeständigen Bodenstabilisierung hat neben der verwendeten Bindemittelart und der Zugabemenge auch die dem Bindemittel vor der Einwirkung des ersten Frosts zum Abbinden zur Verfügung stehende Zeit. Diese darf keinesfalls kürzer als 1 bis 2 Monate sein. Ggf. sind zudem Maßnahmen zur Nachbehandlung (z.B. Befeuchtung) durchzuführen, damit der Abbindeprozess optimal ablaufen und sich die erforderlichen Festigkeiten entwickeln können.

Nach einer erfolgten Überströmung ist ggf. die abgetragene Vegetationsschicht wieder herzustellen. Sollten auch am stabilisierten Dammkörper Schäden durch Erosionserscheinungen aufgetreten sein, so können diese Bereiche durch den Einbau eines geeigneten Boden-Bindemittelgemischs nach den Regeln des Erdbaus repariert werden. Aufglockerte Zonen sind dabei vorher sorgfältig zu entfernen. Auf eine gute Verzahnung der neu eingebauten Bereiche mit dem bestehenden Dammkörper ist zu achten.

Ähnliches gilt, wenn im Zuge einer Sicherheitsanpassung ein bestehender Damm mit einer neuen überströmbaren Damfstrecke aus einer Bodenstabilisierung versehen werden soll. Die stabilisierte Schicht muss ausreichend dick gewählt werden. Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Planung und bei der Ausführung den Übergängen zu benachbarten, nicht überströmbaren Dammbereichen sowie dem Kronen- und dem Fußbereich zu widmen, da Diskontinuitäten im Damm immer mögliche Ausgangspunkte für Erosionsvorgänge darstellen.

## **5. Zusammenfassung**

Die beschriebenen Eigenschaften zusammen mit dem Einsatz gebräuchlicher Fertigungstechniken und Standardgeräten des Erdbaus machen die Bodenstabilisierung auch für den Anwendungsbereich der überströmbaren Dämme zu einem interessanten, weil in der Herstellung einfachen und kostengünstigen Verfahren. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist dabei häufig ein Bindemittelgemisch, welches Zement- und Kalkanteil aufweist, in einer Zugabemenge von nicht weniger als 6 Gew.-% geeignet. Auf die beschriebenen Eigentumsuntersuchungen darf aber im Einzelfall nicht verzichtet werden.

Darüber hinaus bietet die Bauweise die Möglichkeit der sehr guten Einpassung des Dammbauwerks in das Landschaftsbild. Auch eine ggf. erforderliche Reparatur des Dammkörpers aus verfestigtem bindigen Boden stellt kein größeres technisches Problem dar. Die erstmalige Umsetzung der Bauweise in der Praxis steht derzeit noch aus.

#### **Literatur:**

- BOSSHARD, M. (1991): „Überflutbarkeit kleiner Dämme“. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
- BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E.V. (Hrsg.) (1981): „Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk“. 2. Auflage, Köln
- BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L. (1974): „Geohydraulik für Studium und Praxis“. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- DVWK (1991): „Hochwasserrückhaltebecken“. DVWK Merkblatt 202/1991, 2. erw. Auflage Verlag Paul Parey, Hamburg
- DVWK (1986): „Flussdeiche“. DVWK Merkblatt 210/1986, Verlag Paul Parey, Hamburg
- FLOSS, R. (1997): „ZTVE – Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau“. 2. Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn
- FÖRSTER, W. (1996): „Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine“. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig
- FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (1986): „TP BF-StB – Teil B 11.1, Eignungsprüfung bei Bodenverfestigungen mit Zement“. FGSV 591/B11.1, Köln
- FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (1991): „TP BF-StB – Teil B 11.5, Eignungsprüfungen Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat“. FGSV 591/B11.5, Köln
- JESSBERGER, H. L. (1990): „Frost im Baugrund“ in: Grundbau-Taschenbuch, 4. Auflage, Teil 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- KÉZDI, A. (1970): „Handbuch der Bodenmechanik, Teil II“. Akadémiai Kiadó, Budapest
- KUTZNER, CHR. (1996): „Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen“. Enke Verlag, Stuttgart
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1997): „Dammscharten in Lockerbauweise“. Karlsruhe
- MUTH, W. ET AL. (1996): „Hochwasserrückhaltebecken“. 2. verb. Auflage, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim
- WESTRICH, B.; SIEBEL, R.; VERMEER, P.A.; ZWESCHPER, B. (2003): „Neue naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme“. Schlussbericht zum BWPLUS Forschungsprojekt BWC 20004
- WESTRICH, B.; SIEBEL, R.; ZWESCHPER, B. (2003): „Überströmbare Erddämme und Deiche – Erosionssichere Deckwerke, Bodenverfestigung, Bemessungsgrundlagen“, Beitrag zum Symposium Notsicherung von Dämmen und Deichen, Universität Siegen