

# Dammbau und Böschungsverkleidung mit Boden-Zement-Verfestigung

Übersetzung eines Berichts<sup>1)</sup> mit erläuternden Anmerkungen

Von Kurt Walz, Düsseldorf

## Vorbemerkung

*In den Betontechnischen Berichten 1962 ist im Anschluß an eine Studienreise in die USA über die Anwendung der Boden-Zement-Verfestigung zur Verkleidung der Wasserseite von Erdstaudämmen berichtet worden<sup>2)</sup>. Günstige Erfahrungen lagen damals von einem 10 Jahre alten Versuchsabschnitt am Bonny-Speicherbecken vor.*

*Der folgende Bericht über die zwischenzeitliche Anwendung des Verfahrens und über Laboratoriumsuntersuchungen wurde ohne Kürzung übersetzt und soweit angezeigt mit erläuternden Anmerkungen versehen. Alle Werte, Diagramme und Formeln wurden auf das metrische Maßsystem umgestellt.*

*Die Erlaubnis für die Übersetzung wurde freundlicherweise von der PCA erteilt, und die beiden photographischen Aufnahmen sind von ihr zur Verfügung gestellt worden.*

## Übersicht

*Der Bericht befaßt sich mit Laboratoriumsuntersuchungen zur Gewinnung von Entwurfsunterlagen für die Anwendung der Bodenverfestigung mit Zement als Böschungsschutz bei Erdämmen, als wasserundurchlässige Sperrwände und als erosionsbeständige Verkleidung in Zonen mit starker Strömung. Auf die Standfestigkeit von Dämmen aus zementverfestigten Böden wird ebenfalls eingegangen.*

*Die zur Verfestigung des Bodens für den Böschungsschutz notwendige Zementmenge ist von den klimatischen Verhältnissen abhängig. Das übliche Verfahren, den Zementgehalt um zwei Prozent über den zu erhöhen, der nach den Normprüfungen mindestens erforderlich wird, ist gerechtfertigt, wenn auf eine Böschungsverkleidung in der Spritzwasserzone Frost einwirkt. Bei gemäßigten Witterungseinflüssen kann mit der Mindestzementmenge verfestigt werden. Wenn die Böschungsverkleidung star-*

<sup>1)</sup> Nussbaum, P. J., und B. E. Colley: Dam construction and facing with soil-cement. Research and Development Bulletin. Portland Cement Association (PCA), Skokie, Ill., 1971.

<sup>2)</sup> Walz, K.: Bodenzementverfestigung als Verkleidung der Wasserseite von Erdstaudämmen in den USA. beton 12 (1962) H. 4, S. 161/162; ebenso Beton-technische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 63/66.

ker Strömung mit Geschiebe ausgesetzt wird, sind ebenfalls der höhere Zementgehalt sowie ein Zusatz von wenigstens 20 % Kies für die Bodenverfestigung anzuwenden.

Durch einen Böschungsschutz in Form von abgetrepten, zementverfestigten Lagen wird gegenüber glatten Böschungen der Wellenaufschlag verringert. Dazu werden Verfahren zur Berechnung der Wellenhöhe und des -auflaufes angegeben. Steilere Böschungen führen zu höherem Aufschlagen der Wellen.

Durchsickern von Wasser bei Dämmen kann mit Verkleidungen aus zementverfestigtem Boden im Oberwasser, durch Kernmauern oder Schürzen vermindert werden. Die Sickerströmung rechtwinklig zu den eingebauten Lagen ist wesentlich geringer als parallel dazu. Man kann aber durch das Aufbringen einer dünnen Schicht von Zementschlämme auf die obere Fläche einer verdichteten Lage das Durchsickern wesentlich herabsetzen.

## Einführung

Seit vielen Jahren wird Zement dem Boden für die Verbesserung des Untergrundes zugemischt. Wenn Zement, Boden und Wasser so zusammengesetzt werden, daß die erhärtete Mischung die Anforderungen der Frost-Tau-Wechsel- und Abbürstverlust-Kriterien erfüllt<sup>3)</sup>, spricht man von Boden-Zement-Verfestigung. Diese wird zum Bau von Tragschichten und Unterbauten bei Straßen aller Art, für Bankette, Flugplatzdecken und Parkplätze verwendet, um eine feste, dauerhafte Decke großer Tragfestigkeit zu erzielen. Catton [1] beschrieb die frühere Anwendung der Boden-Zement-Verfestigung, und Felt [2] entwickelte Versuchsverfahren und bestimmte Eigenschaftsparameter für eine Reihe von Boden-Zement-Mischungen.

Das vorzügliche Verhalten der Boden-Zement-Verfestigung in bezug auf Erosion, Durchlässigkeit und Scherfestigkeit, die natürlichen Böden überlegen ist, ist für Erddämme von Vorteil. Es lag deshalb auf der Hand, daß die Boden-Zement-Verfestigung für den Bau von Dämmen herangezogen wurde.

Die Boden-Zement-Verfestigung wurde als Böschungsschutz für Erddämme erstmals 1951 in einem Versuchsabschnitt am Südufer des Bonny-Staubeckens in der Nähe von Hale, Colorado, angewendet. Bei diesem Bauwerk war die Boden-Zement-Verfestigung strengen Umweltbedingungen ausgesetzt<sup>4)</sup> und der Nachweis für die Anwendbarkeit dieses Böschungsschutzes für Erddämme erbracht worden. Den abgetrepten Böschungsschutz am Bonny-Staubecken zeigt Bild 1. Einzelheiten über Bauverfahren bei der Boden-Zement-Verfestigung für den Böschungsschutz finden sich in einer Veröffentlichung der Portland Cement Association [3].

<sup>3)</sup> Anmerkung: Siehe auch Fußbemerkung bei Tafel 2.

<sup>4)</sup> Anmerkung: Extreme Kälte- und Hitzegrade sowie starker Wellenschlag; Näheres siehe Quelle in Fußbemerkung<sup>3)</sup>.



Bild 1 Böschungsschutz durch abgetrepte Lagen einer Boden-Zement-Verfestigung

Das U.S. Bureau of Reclamation billigte 1961, nicht zuletzt wegen dieser erfolgreichen Anwendung, die Boden-Zement-Verfestigung für die Merritt-<sup>2)</sup> und Cheney-Dämme [4]. Die wachsende Anerkennung der Boden-Zement-Verfestigung wird durch die Tatsache ausgewiesen, daß dieser Böschungsschutz von behördlichen und privaten Stellen bei mehr als 30 Erddämmen zur Anwendung kam. Weiterhin wird dieser Böschungsschutz auch für erosionsbeständige Beläge auf mannigfaltigen Erdböschungen, wie z. B. bei Kanalverkleidungen und im Küstenschutz, benutzt. Außerdem hat sich die Boden-Zement-Verfestigung bei Dämmen als Dichtungswände und Kernmauern zur Verringerung der Sickerströmung als wirkungsvoll erwiesen.

### **Zweck des Versuchsprogramms**

Mit der Untersuchung waren die vorhandenen Unterlagen über die praktische Durchführung der Boden-Zement-Verfestigung bei Dämmen durch Versuchswerte aus dem Laboratorium zu ergänzen. Die besonderen Anliegen waren:

1. Feststellung der Auswirkung verschiedener Zementgehalte auf das Verhalten der mit Zement verfestigten Böden unter ähnlichen Einflüssen, denen ein Damm oder Kanal unterliegt.
2. Bestimmung von Wellenaufbau-Faktoren für Böschungen aus Boden-Zement-Verfestigung.
3. Untersuchung der Sickerströmung bei Dämmen mit einer Boden-Zement-Verfestigung als Böschungsschutz oder als Kernmauer.
4. Schaffung von Unterlagen über das triaxiale Scherverhalten für die Konstruktion eines Dammes, bei dem der Boden mit Zement verfestigt wird.

## Böden und Zementbedarf

Die Eigenschaften der in der Untersuchung verwendeten Böden werden beschrieben und Versuchsverfahren und -unterlagen wiedergegeben, um bei Dämmen oder Kanälen den Zementbedarf für verschiedene Umweltbedingungen abzuschätzen.

### Böden

Für den Böschungsschutz wurde eine Vielzahl von körnigen Böden verwendet. Die Anteile bis 0,42 mm lagen zwischen 22 und 95 % und die Anteile bis 0,074 mm zwischen 5 und 35 %. Dieser Untersuchung wurden drei Böden zugrunde gelegt. Die Böden A-1-b und A-2-4 [5] sind repräsentativ für die Typen, die bisher am häufigsten verwendet wurden und die für die Verfestigung mit Zement als ideal angesehen werden. Außerdem wurde ein Boden A-4 verwendet, um festzustellen, ob ein feinkörniger Boden für den Böschungsschutz in solchen Gebieten herangezogen werden könnte, in denen geeignetere Böden nicht verfügbar sind

Tafel 1 Kennwerte der Böden \*)

Bodentyp (AASHO)	Norm-Trockendichte [8] kg/dm <sup>3</sup>	optimaler Feuchtigkeitsgehalt %	Fließgrenze %	Plastizitätszahl %	Durchgang durch das 0,074 mm-Sieb %
A-2-4	1,99	10,5	19	4	22
A-1-b	2,22	7,8	NP**)	NP**)	10
A-4	1,83	13,2	NP**)	NP**)	74

\*) Anmerkung: Einreihung in die Klassifizierung nach AASHO (American Association of State Highway Officials)

\*\* ) nicht plastisch

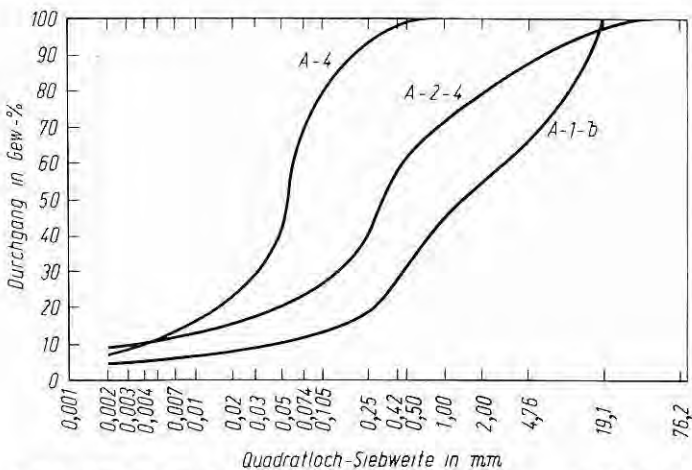


Bild 2 Kornverteilung der drei bei der Untersuchung benutzten Böden A-4, A-2-4 und A-1-b

und wirtschaftliche Überlegungen die dann etwas größere Zementmenge gestatten, die der Frost-Tau- und Erosionswiderstand erfordert. Einige Kennwerte der in dieser Arbeit benutzten Böden werden in Tafel 1 und zugehörige Kornverteilungs-Kurven in Bild 2 aufgeführt.

#### *Zementbedarf für witterungsbeanspruchte Zonen*

Der Zementbedarf für den Böschungsschutz schwankt mit der Bodenart, die verfestigt wird. Für einige Ausführungen ist die Zementmenge um 2% höher festgelegt worden, als sie zur Erfüllung der Bedingungen der ASTM-Feucht-Trocken-Prüfung, Frost-Tau-Prüfung [6] sowie der Abbürstverlust-Kriterien der Portland Cement Association [7] notwendig ist, die beim Bau von Landstraßen angewendet werden. Bei anderen Planungen wurde der Zementgehalt nach der Zementmenge festgelegt, die mit dem Boden die gleiche Haltbarkeit liefert wie beim Bonny-Versuchsabschnitt. Dieses Vorgehen berücksichtigt weder die Strenge der Witterung eines bestimmten Standorts noch die Verschiedenheit der Einflüsse auf verschiedene Teile einer Dammverkleidung.

Die Ausführung wird wirtschaftlicher, wenn die Oberfläche nach den verschiedenen Umwelteinflüssen in Zonen aufgeteilt und hierauf die Zementmenge jeweils abgestimmt wird. Bei diesem Verfahren wird die Oberfläche des Damms in drei Zonen unterteilt:

- (1) in die untere Zone unterhalb des Niedrigwasserstandes; sie ist ständig dem Wasser und nur sehr selten Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt;
- (2) in die Zone zwischen Niedrigwasserstand und dem normalen Spritzwasserbereich; auf sie wirken in Gegenwart von Wasser strenge Frost-Tau-Wechsel und
- (3) in die oberste Zone; sie bleibt im allgemeinen trocken, ist jedoch der Witterung ausgesetzt.

Es ist offensichtlich, daß Zone 2 am stärksten, Zone 3 mäßig und Zone 1 am wenigsten beansprucht wird.

Um die erforderliche Zementmenge zu bestimmen, wurden bei den Laboratoriumsversuchen die Umweltverhältnisse für jede Zone nachgeahmt. Die Proben wurden in zwei Lagen mit optimalem Feuchtigkeitsgehalt und Normdichte [8] hergestellt. Die obere Lage wurde zwei Stunden nach Verdichtung der unteren eingebracht. Man wählte dieses Verfahren, um eine Anbindefläche mit teilweisem Verbund, ähnlich wie in der Praxis, zu erhalten. Die Anbindefläche wurde vor dem Aufbringen der oberen Lage aufgerauht, naß oder trocken gehalten oder mit Zementschlämme versehen. Außerdem wurden die Auswirkungen eines zeitlichen Abstandes von 24 bis 60 Stunden zwischen dem Einbringen der oberen auf die untere Lage untersucht.

Nach der Herstellung wurden die Proben 7 Tage in einer Nebelkammer nachbehandelt und dann Umweltbedingungen ausgesetzt. Es ist zu beachten, daß die 7tägige Nachbehandlungsdauer beträchtlich unter der Zeit liegt, die in der Praxis zwischen der Aus-

führung und dem Einwirken strenger Umwelteinflüsse zu erwarten sein dürfte. Als Kurzzeitprüfung wurden für Zonen 1 folgende Zyklen ausgeführt: 17stündiges Trocknen bei 22 °C und 50 % rel. Feuchte, dann 7stündige Einwirkung eines Wasserstrahls mit einem Druck von 1,9 kp/cm<sup>2</sup> aus einer Öffnung von 3,2 mm Durchmesser. Man wertete diese Beanspruchung als sehr stark, da sie dem Druck einer rd. 19 m hohen Wassersäule oder dem Aufprall einer 4,9 m hohen Welle entspricht. Der Erosionsversuch wurde angewandt, um die Erosionskräfte der Wellen auf die Dammverkleidung nachzuahmen.

Die auf Zone 2 abgestimmte Behandlung bestand aus 17stündiger Frosteinwirkung bei — 29 °C und 7stündiger Wasserstrahleinwirkung. Für Zone 3 wurde als Beanspruchung die Norm-Frost-Tau-Prüfung und die Abbürstverlust-Prüfung benutzt. Bei allen Versuchen wirkten je 12 dieser Zyklen.

Der Gewichtsverlust in % nach den Beanspruchungen ist für den Boden A-2-4 in Bild 3 wiedergegeben. Für einen zulässigen Gewichtsverlust von 14 % betragen bei trockener Anbindefläche der unteren Lage die erforderlichen Zementmengen nach der Ausgleichslinie für die Zonen 1, 2 und 3 rd. 0,7 Gew.-%, 6 Gew.-% und 4 Gew.-%. Da für Zone 2 um 2 % mehr Zement als für Zone 3 gefordert war und weil eine wirksame Verfestigung mit weniger als 2 % Zement unzweckmäßig ist, ist die Zementmenge, die mit der Norm-Frost-Tau-Prüfung und der Abbürstverlust-Prüfung bestimmt wird, ein praktischer Richtwert für den Zementgehalt der Zone 3. Für Zone 2 wird diese Menge um 2 % erhöht und für Zone 1 um 2 % vermindert, jedoch nicht unter 2 %. Ähnliche Versuche wurden mit den Böden A-1-b und A-4 durchgeführt. Die Ergebnisse mit dem Boden A-1-b bestätigten die Feststellung, daß für körnige Böden ein Zementgehalt, der 2 % über dem bei den Normprüfungen bestimmten liegt, den harten Anforderungen an Zone 2 gerecht wird. Außerdem bestätigten die Ergebnisse der auf die Zonen 1 und 3 abgestimmten Prüfungen die Folgerungen, die für den Boden A-2-4 gezogen wurden.

Der Zementbedarf für die drei Böden in den drei Zonen ist in Tafel 2 zusammengestellt. Nach diesen Werten erscheint das derzeitige Vorgehen, die Zementmenge um 2 % über die mit den Normprüfungen festgelegte zu erhöhen, gerechtfertigt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, durch Vermindern der Zementmenge, die derzeit für die Zonen 1 und 3 angesetzt wird, wirtschaftlicher zu bauen.

Die Härte der Wasserstrahlbehandlung wurde durch die Tatsache bestätigt, daß beim Boden A-4 die Probe durchlöchert wurde. Deshalb würde man diesen Boden nicht ohne Verbesserung bei sehr harten Umweltbedingungen empfehlen. Eine Verfahrensart zur Abwandlung eines Bodens A-4 wird bei der Erörterung der Erosion durch geschiebeführende Strömungen beschrieben (Anmerkung: Siehe im nächsten Abschnitt).

Wenn der Wasserstrahl rechtwinklig zur Verdichtungsebene einwirkte, wurden keine wesentlichen Unterschiede im Erosionsverlust bei den Proben mit zeitlich verschieden eingebrachter oberer Schicht festgestellt. Wurde der Strahl jedoch gegen die Berüh-

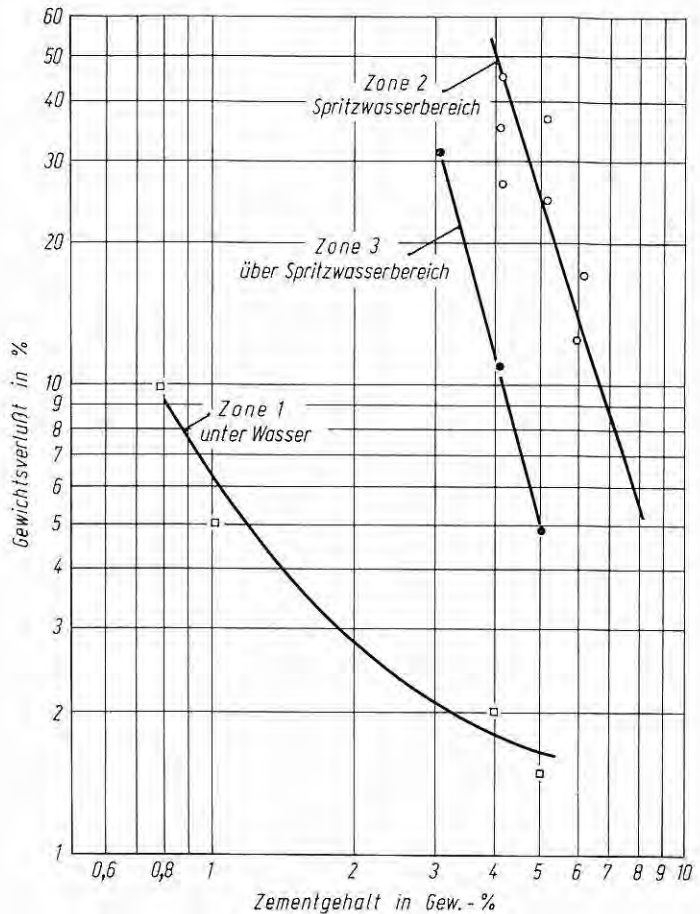


Bild 3 Beziehung zwischen Zementgehalt und Gewichtsverlust durch eine auf drei Böschungszonen abgestimmte Versuchsbeanspruchung für Boden A-2-4

Tafel 2 Zementbedarf für die drei Böden zu den drei Beanspruchungszonen

Bodentyp (AASHO)	Zement in Gew.-% des trockenen Bodens		
	Zone 1	Zone 2	Zone 3*)
A-2-4	2,0	6,0	4,0
A-1-b	2,0	5,0	3,0
A-4	5,5	9,5	7,5

\*) Norm-Frost-Tau-Wechsel-Prüfung mit dem PCA-Abbrüstverlust-Kriterium. (Anmerkung: Siehe darüber [6; b] sowie „Vorläufiges Merkblatt für Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit Zement“, Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen; Arbeitsgruppe Untergrund, Köln 1968, Abschnitt 4.5.)



rungsfläche und parallel dazu gerichtet, so konnte eine merkliche Verringerung der Erosion erreicht werden, wenn die untere Lage unmittelbar vor dem Aufbringen der oberen mit Zementschlämme versehen wurde. Dies war auch dann der Fall, wenn der Zeitabstand zwischen Herstellung der beiden Lagen 60 Stunden betrug. Zum Beispiel verringerte eine Schlammeschicht auf der Anbindefläche des verfestigten Bodens A-2-4 den Erosionsverlust von 14 % auf rd. 4 %.

### **Abnutzwiderstand bei Geschiebeführung**

Mit Zement verfestigte Dämme werden gelegentlich dort errichtet, wo schnelle, Geschiebe führende Strömungen die Böschung abnutzen. Die gegen Erosion zu fordernde Zementmenge und die Kornverteilung des Bodens wurden mit Proben untersucht, die einer kiesführenden Wasserströmung ausgesetzt wurden. Nach 7tägiger Lagerung in der Nebelkammer wirkten auf die Proben täglich rd. 30 m<sup>3</sup> Wasser ein, in dem 3,8 t Kies 3/6 mm mitgeführt wurden. Es floß dabei 2,5 cm breit und 1,3 cm tief mit 1,16 m/s über eine Probe. Um ein Höchstmaß an Abnutzwirkung zu erzielen, wurde bei geringer Fließgeschwindigkeit der Wasserstrom so geleitet, daß er den Kies am Boden führte.

Die Ergebnisse der Versuche, die die Ufererosion nachahmten, finden sich in Bild 4 als Zeit für eine Abtragung von 2,5 cm, im oberen Teil abhängig vom Zementgehalt der Böden A-1-b und A-4 und im unteren Teil abhängig vom Kiesgehalt dargestellt (einschließlich des Kornanteils > 6 mm im Boden selbst). Nach Bild 4 war der Abnutzwiderstand des zementverfestigten Bodens A-1-b ausgezeichnet und übertraf den des Bodens A-4 für alle untersuchten Zementgehalte. Die Zeit für eine Abtragung von 2,5 cm lag für den Boden A-4, selbst bei einem Zementgehalt von 13,5 %, unter zwei Tagen. Im Gegensatz dazu zeigte der Boden A-1-b überragenden Erosionswiderstand; wenn dieser Boden mit 5 % Zement verfestigt wurde, verstrichen bis zu einem 2,5 cm tiefen Abtrag 15 Tage.

Wegen des besseren Verhaltens des körnigen Bodens wurden weitere Versuche durchgeführt, bei denen man verschiedene Kiesmengen > 6 mm aus dem Boden A-1-b absiebte und dem Boden A-4 zusetzte. Diese Versuche lassen erkennen, daß der Kiesanteil den Abnutzwiderstand wesentlich beeinflußt. So wurde z. B. die Zeit für eine 2,5 cm tiefe Abtragung des zementverfestigten abgewandelten Bodens A-4 wesentlich erhöht, wenn der Kiesanteil mehr als 20 Gew.-% betrug. Es zeigte sich sogar, daß mit 30 % Kies und 9,5 % Zement der Boden A-4 fast so erosionsbeständig wurde wie Boden A-1-b.

Den Kies-Erosions-Versuchen wurde auch ein besonderer Kiesbeton mit niedriger Festigkeit unterworfen, um eine ungefähre Vorstellung über die Strenge des Versuchs zu erhalten. Für diesen Beton mit 140 kp/cm<sup>2</sup> Druckfestigkeit nach 28 Tagen betrug der Wasserzementwert 0,6. Nach 7tägiger Feuchtlagerung wurden 33 Tage zum Abtragen von 2,5 cm benötigt. Demnach lag der Abnutzwiderstand dieses Betons etwa doppelt so hoch wie der des zementverfestigten Bodens A-1-b mit 7 % Zement. Es wurde



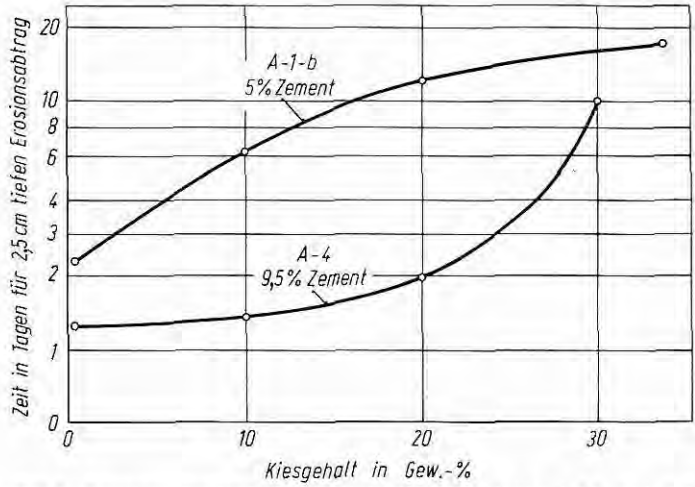
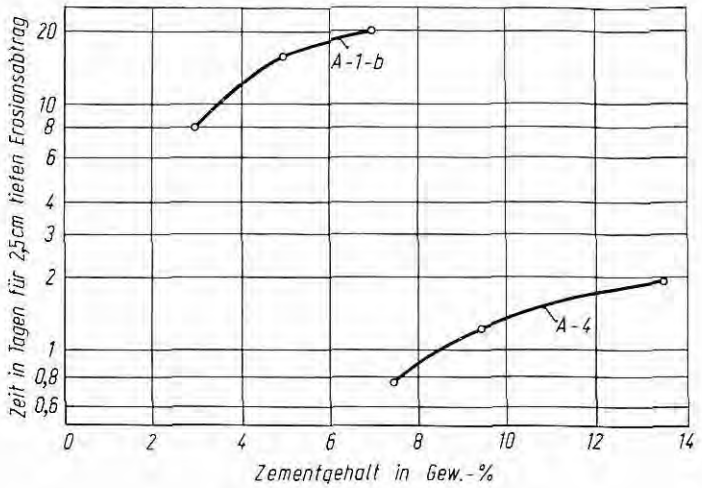


Bild 4 Erosionswiderstand der zementverfestigten Böden A-1-b und A-4, abhängig vom Zement- und Kiesgehalt

deshalb die Schlußfolgerung gezogen, daß die Prüfung mit Wasser, das Kies führt, die Abnutzung merklich beschleunigt.

Der Einfluß des Festigkeitsanstiegs mit dem Alter wurde durch eine Erhöhung der Nachbehandlungszeit von 7 auf 28 Tage erkundet. Der Abnutzwiderstand der mit 7,5 bzw. 3 Gew.-% Zement verfestigten Böden A-4 und A-1-b erhöhte sich dadurch um 50 %.

Bei der 6tägigen Einwirkung einer Wasserströmung ohne Kies von 60 m<sup>3</sup> je Tag trat bei den Böden A-4 und A-1-b mit 1,5 bzw. 0,75 % Zement keine Erosion auf. Das deutet darauf hin, daß

Strömungen, die kein Geschiebe führen, nur eine geringe oder keine Erosionswirkung auf Böden ausüben, auch wenn sie nur mit geringen Zementmengen verfestigt wurden. Kanalverkleidungen aus Boden-Zement-Verfestigung sind im allgemeinen nur geschiebefreier Strömung ausgesetzt; sie können daher mit der bei der Normprüfung festgestellten Mindestzementmenge gebaut werden.

### Wellen-Auflauf

Die gegen Erosion schützende Dammverkleidung kann als Wellenbrecher wirken und den Wellenauflauf herabsetzen. Böschungsneigung und die Rauheit der Verkleidung sind zwei wichtige Größen bei der Festlegung der Dammhöhe oberhalb des Höchstwasserstandes. Auflaufwerte für Boden-Zement-Verkleidungen wurden durch Versuche in einer Wellenwanne bestimmt.

### Versuche

Die Versuchsböschungen wurden in verkleinertem Maßstab am Ende einer 9,1 m langen Wellenwanne eingebaut. Die Wanne war 30 cm breit und 91 cm tief; die Wassertiefe wurde mit 53 cm konstantgehalten. Die Wellen wurden mit einer Kolben-Wellenmaschine erzeugt und die Wellenhöhe und Wellenperiode durch Veränderung des Laufweges und der Geschwindigkeit des Kolbens verändert. Das Verhältnis der Wassertiefe zu Wellenhöhe ( $D/H$ ) war am Böschungsfuß bei allen Versuchen 3 oder größer als 3. Als Veränderliche wurden verschiedene Rauheitsgrade bei Böschungsneigungen von 1:3 und 1:2 geprüft. Die 1:3-Böschung bestand aus 2,5 cm dicken Lagen, die – um 7,5 cm versetzt – treppenartig aufeinanderfolgten; dazu kamen Versuche mit 5 cm dicken Lagen, die um 15 cm versetzt waren. Eine unterschiedliche Oberflächenrauheit ergab sich durch Prüfung



Bild 5 Wellenauflauf in der Versuchswanne mit abgetreppter Böschung aus zementverfestigtem Boden

von Ausführungen mit scharfer und gerundeter Abtreppkante. Eine Fläche aus Beton, die mit einer hölzernen Glattscheibe bearbeitet worden war, wurde als repräsentativ für eine glatte Oberfläche angesehen. Die hierfür erhaltenen Prüfwerte dienen als Vergleichsbasis für die Boden-Zement-Verfestigung.

In Bild 5 ist ein Versuch wiedergegeben. Die gemessenen Größen sind aus Bild 6 ersichtlich, danach ist die Wellenhöhe  $H$  der senkrechte Abstand zwischen Wellenkamm und Wellental der Wellenzugs, die Wellen-Auflaufhöhe  $R$  die vertikale Projektion der Auflauflänge des Wassers auf der Böschung, bezogen auf

$H$  = Wellenhöhe  
 $R$  = Wellen-Auflaufhöhe  
 $L$  = Wellen-Länge  
 $T$  = Wellen-Zeitperiode  
 $S$  = Stufenbreite

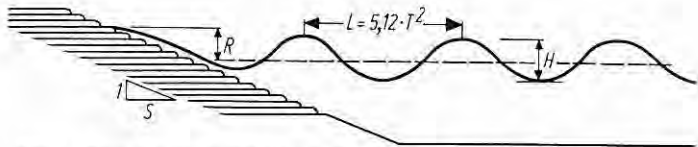


Bild 6 Bezeichnungen und Meßgrößen bei den Wellenaufbau-Versuchen

den Ruhewasserspiegel, und die Wellenperiode  $T$  die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Wellenköpfen.

Die Versuchswerte sind in den Bildern 7 und 8 dimensionslos als Auflauf-Faktoren  $R/H$  und Steilheitsfaktor  $H/T^2$  aufgetragen, wobei  $L$  die Wellenlänge gleich  $5,12 T^2$  ist. (Anmerkung: Im metrischen Maßsystem ist  $L [m] = 1,56 T^2$ .)

Den Ausgleichskurven liegen etwa 110 einzelne Auflaufversuche zugrunde. Die Reststreuung beträgt 0,13. (Anmerkung: Das heißt, daß 68,3 % aller Versuchswerte um höchstens 0,13  $R/H$  von der Ausgleichskurve abweichen; ein Beispiel für die Anwendung der Diagramme in Bild 7 und 8 findet sich im nächsten Abschnitt.) Bezogen auf eine etwa 1,5 m hohe Welle entspricht 0,13  $R/H$  ungefähr 18 cm.

Da die erforderliche Höhe über dem Wasserspiegel (Freibord) mit einer Abnahme des Aufauffaktors kleiner wird, ist zu entnehmen, daß alle Verkleidungen mit Boden-Zement-Verfestigungen den Auflauf hemmen. Wie zu erwarten, waren die scharfkantigen Abtreppungen 2 : 6 und 1 : 3 wirkungsvoller als die Abtreppungen 1 : 3 mit gerundeter Kante. Außerdem war die Abtreppung 1 : 3 wirkungsvoller als die Abtreppung 2 : 6.

In der Praxis rührt die gerundete Kante von der Erosion der unzureichend verdichteten wasserseitigen Fläche der Lagen her, die auf eine fehlende Abstützung der Kante während des Walzens zurückzuführen ist. Wegen der wesentlich besseren Wirkung der scharfen Kante wurden Verdichtungsversuche in natürlicher Größe

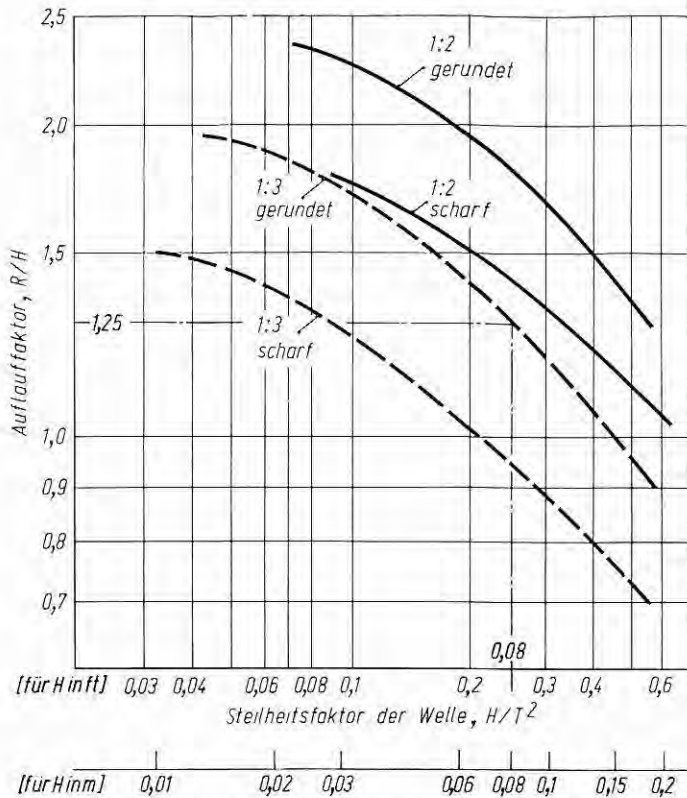


Bild 7 Wellenaufbau bei Böschungen mit Abtreppungen 1 : 2 und 1 : 3 sowie gerundeter und scharfer Treppenkante (Anmerkung: Siehe dazu Bild 6. Für den Steilheitsfaktor  $H/T^2$  gelten  $H$  in Fuß (ft) bzw. in m und  $T$  in s)

mit einem Plattenrüttler durchgeführt, um festzustellen, ob damit eine erosionsbeständigere Kante erhalten wird. Dabei ergab sich, daß die Boden-Zement-Verfestigung mit den benutzten Böden A-2-4 und A-1-b sich leicht auf 100 % der Normdichte verdichten ließ. Außerdem lieferte die Rüttelverdichtung dieser Böden in einer beweglichen Holzschalung eine scharfe Kante mit einem gleich hohen Verdichtungsgrad. Beim Rütteln einer zweiten Lage auf einer frisch eingebrachten unteren Lage bildeten sich in dieser keine Risse. Eine praktische Versuchsausführung sollte erwogen werden.

Neben der Bedeutung von scharfen Kanten gegenüber gerundeten zeigten die Ergebnisse, daß die größeren Stufen der 2 : 6-Böschung den Auflauf nicht so wirkungsvoll herabsetzten wie die kleineren, aber zahlreicheren Stufen der 1 : 3-Böschung. Auch war die 1 : 3-Böschung wesentlich wirkungsvoller als die steilere 1 : 2-Böschung.

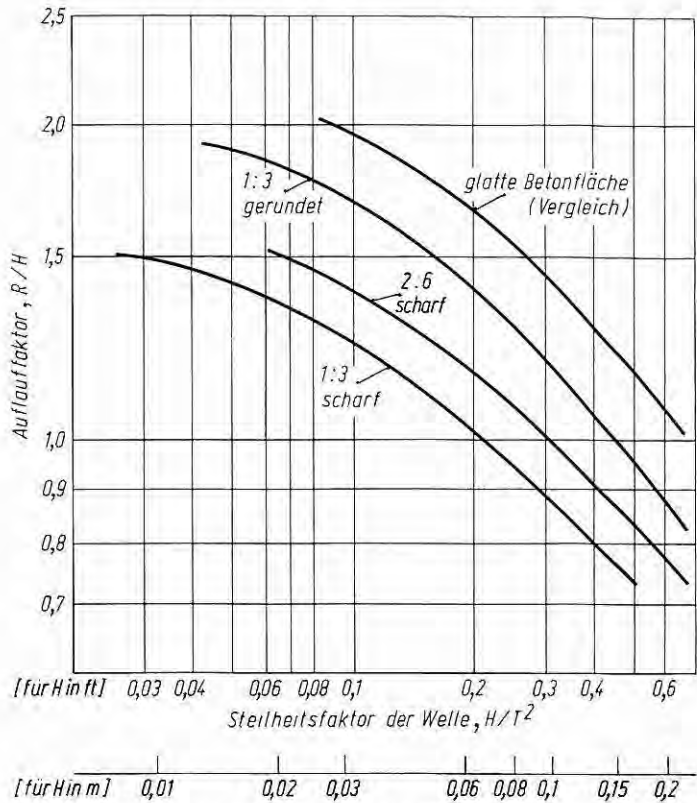


Bild 8 Wellenaufbau bei Böschungen mit Abtreppungen 1:3 und 2:6 sowie gerundeter und scharfer Treppenkante im Vergleich zu einer glatten, nicht abgetrepten Betonfläche. (Anmerkung: Siehe dazu Bild 6. Für den Steilheitsfaktor  $H/T^2$  gelten  $H$  in Fuß (ft) bzw. in m und  $T$  in s)

#### Auswertung der Auflauf-Daten

Zur Veranschaulichung der Angaben in Bild 7 wird als Beispiel die Freibordhöhe (Anmerkung: Kronenhöhe über dem Wasserspiegel) eines Staubeckens mit gerundeter Abtreppung 1:3 berechnet. Dabei sind

$F_e$  = wirksame, ungestörte Windstrichstrecke auf der Wasserfläche = 5791 m;

$F_s$  = Gesamtstrecke der Wasserfläche in Windrichtung = 12,872 km;

$V$  = Windgeschwindigkeit über dem Wasser = 28,4 m/s;

$D$  = durchschnittliche Tiefe des Beckens = 15,2 m;

$g$  = 9,81 m/s<sup>2</sup>.

(Anmerkung: Nach [9], S. 101 und S. 107, ist  $F$ , hier  $F_s$ , die Länge der durchgehenden Wasserfläche, über die der Wind in einer im

wesentlichen gleichen Richtung weht; d. h. die Länge der Wasserfläche, auf der eine Tide durch Wind erzeugt wird. Die Windtide, hier  $S$ , ist die Höhe des Wasseraufstaus, der am leeseitigen Ende durch den Windangriff auf die Wasseroberfläche entsteht.

$F_s$  wird für die Berechnung der Windtide  $S$  und  $F_e$  für die Berechnung der Wellenhöhe  $H$  und -periode  $T$  benutzt. Dabei ist  $F_e$  die wirksame Windstrichstrecke. Sie ergibt sich bei Binnengewässern in der Regel kürzer als die Gesamtstrecke  $F_s$ ;  $F_e$  wird unter Berücksichtigung der Breiten- und Längenverhältnisse der bestrichenen Wasserfläche und ggf. zwischenliegender Einbauten nach [9] abgeleitet.)

Die Wellenhöhe  $H$  wird mit der von Bretschneider überarbeiteten Sverdrup-Munk-Formel und den von Saville [9] gelieferten Daten für Staubecken im Binnenland errechnet:

$$H = \frac{V^2}{g} \left[ 0,0026 \left( \frac{g F_e}{V^2} \right)^{0,47} \right] = 1,55 \text{ m}$$

Nach diesen Unterlagen wird auch die Wellenperiode  $T$  erhalten [9]:

$$T = \frac{V}{g} \left[ 0,46 \left( \frac{g F_e}{V^2} \right)^{0,28} \right] = 4,4 \text{ s}$$

Aus Wellenhöhe  $H$  und -periode  $T$  errechnet sich ein Steilheitsfaktor  $H/T^2$  von 0,08. Dafür erhält man aus Bild 7 den Auflaufkoeffizienten  $R/H$  zu 1,25. Für die Welle mit einer Höhe  $H$  von 1,55 m beträgt somit die Wellen-Auflaufhöhe  $R$  rd. 1,95 m.

Die Freibordhöhe zur Verhinderung des Überspritzens wird vom höchsten Betriebswasserstand aus gemessen; sie setzt sich aus der Wellen-Auflaufhöhe  $R$  und einer Höhe  $S$ , der Windtide, zusammen.  $S$  wird mit folgender Formel [9] berechnet:

$$S = \frac{V^2 F_s 0,305}{1400 D} = 0,15 \text{ m}$$

Die Auflaufhöhe  $R$  und die Höhe  $S$  ergeben zusammen eine Freibordhöhe von 2,10 m. (Anmerkung: Die drei, z. T. nicht dimensionsgerechten Formeln gelten nur mit den Maßeinheiten, die oben bei den einzusetzenden Werten aufgeführt sind.)

In der gleichen Weise errechnet sich die Kronenhöhe über dem Wasserspiegel (Freibordhöhe) für die scharfkantige Abtreppung der Boden-Zement-Verfestigung zu 1,52 m und für den glatten Beton zu 2,32 m.

### Sickerströmung durch Dämme

Das Durchsickern hat für die Beständigkeit von Erddämmen erhebliche Bedeutung. Es kann durch richtige Auswahl der Böden für die Böschung, durch Drainageverfahren oder durch undurchlässige Sperrschichten eingeschränkt werden. Durch den Einbau verhältnismäßig undurchlässiger Zonen wie Kernmauern, Absperren gegen Unterspülung oder durch Dichtungsvorlagen im Oberwasser wird eine Wasserströmung durch den Damm unterbunden. Für die abdichtenden Zonen werden im allgemeinen die

am wenigsten durchlässigen Böden in Dammnähe ausgewählt. In Gebieten jedoch, wo keine Böden mit geringer Durchlässigkeit zur Verfügung stehen, ist es möglich, die Durchlässigkeit durch eine Verfestigung mit Zement herabzusetzen.

Durch die Versuchsergebnisse wird der Einfluß des Zementgehalts und des zeitlich verzögerten Einbaus der Lagen auf die Durchlässigkeit hervorgehoben. Da sich in zementverfestigten Böschungen Schwindrisse bilden, wird mit Modellversuchen der Einfluß der Rißbildung auf das Durchsickern dargestellt.

### Durchlässigkeit

Zur Untersuchung der Wasserströmung, sowohl rechtwinklig als auch parallel zur Verdichtungsebene, wurden Durchlässigkeitsversuche mit konstantem äußerem Wasserdruck in besonders angefertigten viereckigen Schalungen durchgeführt. Die Proben wurden in zwei Lagen dynamisch bei optimalem Feuchtigkeitsgehalt auf Normdichte [8] verdichtet und dann vor der Prüfung in einer Nebelkammer 7 Tage lang nachbehandelt. (Anmerkung: Angaben über die Höhe des Wasserdrucks und der Probenabmessung sind im Bericht nicht gemacht.) Der Einfluß des Zementgehalts und der Strömungsrichtung auf die Durchlässigkeit der Böden A-1-b, A-2-4 und A-4 ist in Tafel 3 für die zeitlich unmittelbar nacheinander eingebrachten und verdichteten beiden Lagen aufgeführt.

Tafel 3 Wasserdurchlässigkeit  
Aufeinanderfolgende Lagen ohne Zeitabstand eingebracht und verdichtet

Zement- gehalt Gew.-%	Durchlässigkeit in cm/Jahr					
	A-1-b		A-2-4		A-4	
	recht- winklig	parallel	recht- winklig	parallel	recht- winklig	parallel
0	91,5	70,1	15,3	30,1	15,3	36,6
1	21,3	33,5	1,8	6,1	9,1	—
3	2,1	18,3	0,6	12,2	6,1	12,2
5	0,3	3,1	0,6	6,1	3,1	—
7,5	—	—	—	—	1,8	3,1
9,5	—	—	—	—	1,5	—
11,5	—	—	—	—	0,9	2,4

Unter den Versuchsbedingungen nahm die Durchlässigkeit für diese Böden mit der Erhöhung des Zementgehalts ab. Wenn z. B. der Zementgehalt den Normbedingungen für Boden-Zement-Verfestigungen entsprach, ergaben die Prüfungen rechtwinklig zur Verdichtungsebene Durchlässigkeiten, die nur 1,2 bis 12 % der Werte für die Böden ohne Zement erreichten. Wenn die Strömung parallel zur Verdichtungsebene verlief, verringerte sich die Durchlässigkeit mit der Zunahme des Zementgehalts ebenfalls. Jedoch war die Durchlässigkeit bei einer Strömung parallel zur Verdichtungsebene 2- bis 20mal größer als bei der rechtwinklig dazu gerichteten.



Zur Nachahmung der Baupraxis wurden auch Prüfungen an Proben durchgeführt, die mit einem zeitlichen Abstand zwischen der Verdichtung der beiden Lagen hergestellt worden waren. Bei Zeitabständen von 0 und 6 Stunden und einer zur Verdichtungsebene rechtwinkligen Strömung waren die Durchlässigkeitswerte gegenüber den Werten in Tafel 3 verhältnismäßig unverändert. Wie jedoch Tafel 4 ausweist, erhöhte sich bei einer Strömung parallel zur Verdichtungsebene die Durchlässigkeit mit längeren Zeitabständen. So nahm z. B. die Durchlässigkeit für den Boden A-2-4 mit 3 Gew.-% Zement von 12 cm/Jahr auf 37 cm/Jahr zu, wenn der Zeitabstand von 0 auf 6 Stunden geändert wurde. Ähnlich erhöhte sich die Durchlässigkeit für den Boden A-1-b mit 3 % Zement von 18 cm/Jahr auf 366 cm/Jahr. Im letzten Beispiel verringerte das Aufbringen von Zementschlämme auf die untere Lage unmittelbar vor dem Einbringen der zweiten Lage die Durchlässigkeit auf einen Wert, der mit dem für die rechtwinklig gerichteten Strömungen erhaltenen Wert vergleichbar ist. Obwohl nicht so wirkungsvoll wie Zementschlämme, wurde das Durchsickern auch durch ein mechanisches Verfahren verringert. Dabei

Tafel 4 Wasserdurchlässigkeit  
Aufeinanderfolgende Lagen mit Zeitabstand eingebracht und verdichtet

Zement- gehalt Gew.-%	Zeit- abstand Stunden	Durchlässigkeit in cm/Jahr					
		A-1-b		A-2-4		A-4	
		recht- winklig	parallel	recht- winklig	parallel	recht- winklig	parallel
1	0	21,3	33,5	1,8	6,1	—	—
	6	24,4	396	2,4	27,5	—	—
3	0	2,1	18,3	0,6	12,2	6,1	12,2
	6	1,8	366	0,9	36,6	6,1	15,3
5	0	—	—	0,6	6,1	—	—
	6	—	—	0,3	64,1	—	—
7,5	0	—	—	—	—	1,8	3,1
	6	—	—	—	—	1,5	61,0

wurde die obere Fläche der unteren Lage mindestens 1,3 cm tief aufgeritzt. Die zweite Lage wurde dann auf der ersten Lage verdichtet, um so eine Verzahnung der beiden Lagen zu erzielen.

#### Durchsickern

Zur Bestimmung des Einflusses von Rissen in einem undurchlässigen Dichtungsbelag im Oberwasser auf die Sickerung durch das Stützbauwerk wurden Sickerversuche in einem Modellgerinne durchgeführt. Außerdem wurde die Wirksamkeit von Dichtungswänden abgeschätzt.

Das Modellgerinne war 214 cm lang, 30,5 cm breit und 61 cm tief. Die Durchlässigkeitsziffern der bei diesen Versuchen verwendeten

Baustoffe betragen  $91 \cdot 10^6$  cm/Jahr für den Damm ( $k_e$ ) und  $91 \cdot 10^4$  bzw.  $91 \cdot 10^3$  cm/Jahr für einen Dichtungsbelag bzw. eine Dichtungswand ( $k_c$ ). Die Sicker Mengen zur Bestimmung des Einflusses von Rissen wurden an Böschungen 2,5 : 1 ermittelt, wobei die Risse mit Hilfe eines Metallrahmens mit Meßvorrichtung von 0,8 bis 6 mm verändert wurden.

Die Ergebnisse der Sicker Versuche werden in Bild 9 wiedergegeben; sie sind auf den prozentualen Anteil der Rißfläche an der wasserseitigen Belagfläche bezogen und auf die prozentuale Zunahme der Sicker Menge gegenüber der Sicker Menge ohne Rißbildung. Die Versuche wurden für zwei Voraussetzungen durchgeführt: (1) für einen Damm auf undurchlässigem Untergrund und (2) für einen Damm mit Dichtungswand, die sich vom Unterteil des Dammes bis zu einer unteren undurchlässigen Begrenzungsschicht erstreckt.

Es ist zu ersehen, daß sich die Sicker Menge exponentiell von 3 auf 150 % mit der Zunahme der Rißfläche von 0,2 auf 2,5 % erhöhte. Zur Deutung dieser Werte ist es erforderlich, Beobachtung-

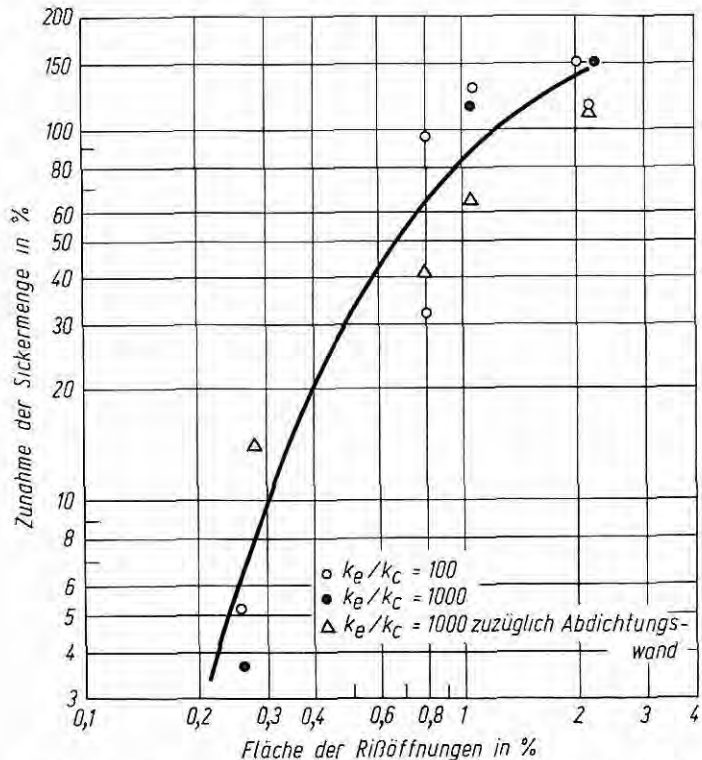


Bild 9 Zunahme der Sicker Menge abhängig vom Verhältnis der Fläche der Rißöffnungen zur gesamten Fläche des Dichtungsbelags ( $k_e$  = Durchlässigkeitsziffer für den Dammbaustoff;  $k_c$  = Durchlässigkeitsziffer für den Dichtungsbelag oder eine Dichtungswand)

gen aus der Praxis mit bereits beanspruchten Dichtungsbelägen heranzuziehen, die Schwindrisse mit Weiten von 3 mm bis 6 mm bei Abständen von 2,7 m bis 5,5 m aufweisen. Nimmt man die größere Rißweite bei kürzeren Abständen an, so ergibt das eine Rißfläche von nur 0,23 % der Belagsfläche. Damit wird nach Bild 9 eine um etwa 5 % erhöhte Sickermenge erhalten. Dies besagt, daß Zunahmen des Durchflusses infolge von Schwindrissen in der Boden-Zement-Verfestigung wahrscheinlich nicht bedeutend sind. Deshalb trägt der Belag zur Beständigkeit des Dammes bei, wenn die eigentliche Durchlässigkeit des Belags geringer ist als die des Damminnenen.

Ergebnisse der Durchströmungsversuche zur Beurteilung der Brauchbarkeit der Boden-Zement-Verfestigung als Abdichtungswand wurden in Bild 10 aufgetragen. Diese Angaben gelten für ein Durchlässigkeitsverhältnis von durchlässigem Untergrund zu Abdichtungswand von 50 und für Ausführungen, bei denen die Abdichtungswand bis unter die Sohle einer Kernmauer oder bis unter den Fuß eines Dichtungsbelages im Oberwasser reicht. Die Versuchswerte stimmen gut mit der Arbeit von Cedergren [10] überein und beweisen, daß das Durchströmen von durchlässigen Dammsohlen durch Absperrungen aus einer Boden-Zement-Verfestigung wesentlich herabgesetzt werden kann.

Kernmauern aus einer Boden-Zement-Verfestigung können gleichzeitig mit dem Auftragen und dem Verdichten der Erdschüttung gebaut werden. Die sich ergebende Absenkung der Sickerlinie

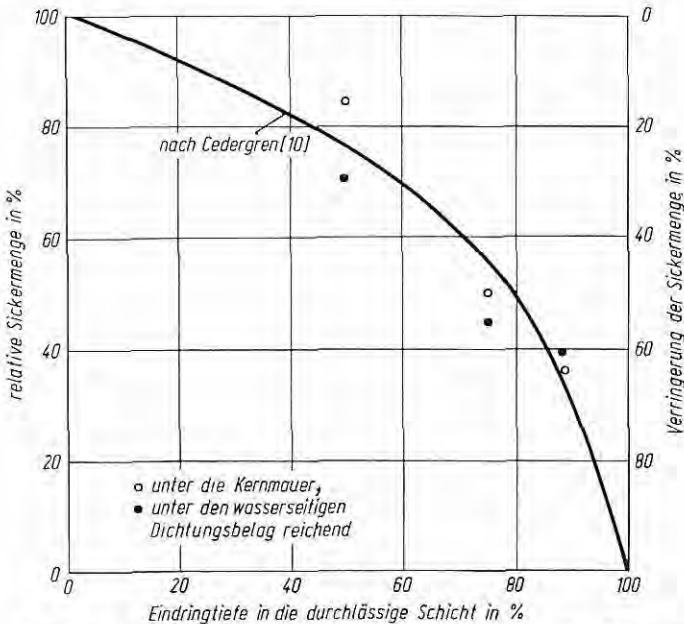


Bild 10 Auswirkung einer Abdichtungswand auf die Menge des Sickerwassers durch den Damm

3) Anmerkung: Nach den Angaben in [12], nicht mit Wasser gefüllter Porenraum“.

- H = Höhe der Sickerlinie über der Dammsohle; veränderte GröÙe
  - L = Länge vom Dammfuß im Oberwasser bis zum Abfluß im Unterwasser; 500 ft (152,5 m)
  - k = Durchlässigkeitsziffer; 35 ft/Jahr (10,7 m/Jahr)
  - n<sub>e</sub> = wirksame Bodenporosität<sup>3)</sup>; 0,20
  - C = Korrekturfaktor; 1,0
- es bedeuten

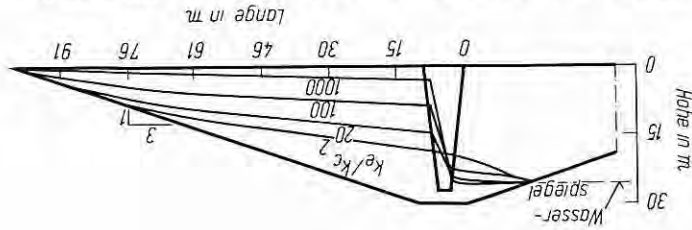
$$t = \frac{C n_e}{2k} L \left[ F \left( \frac{H_i}{H} \right) \right] :$$

Maßnahmen zur Entwässerung hinter verhältnismäßig undurchlässigen Böschungsbeilagen im Oberwasser werden nur für außer-gewöhnliche Betriebsbedingungen verlangt, bei denen ein rasches Absenken zu einem hydraulischen Grundbruch führen könnte. Ein Verfahren zum Entwurf einer Filterschicht an der Oberwasserseite erfordert die Berechnung der Zeit t für das Absenken der Sickerlinie im Damm [12]:

*Rasches Absenken*

Maßnahmen zur Entwässerung hinter verhältnismäßig undurchlässigen Böschungsbeilagen im Oberwasser werden nur für außer-gewöhnliche Betriebsbedingungen verlangt, bei denen ein rasches Absenken zu einem hydraulischen Grundbruch führen könnte. Ein Verfahren zum Entwurf einer Filterschicht an der Oberwasserseite erfordert die Berechnung der Zeit t für das Absenken der Sickerlinie im Damm [12]:

Bild 11 Auswirkung einer Kernmauer auf das Absenken der Sickerlinie (k<sub>e</sub> = Durchlässigkeitsziffer für den Damm; k<sub>c</sub> = Durchlässigkeitsziffer für den Kern)



hängt vom Durchlässigkeitsverhältnis des Erdammes zum zementfestigten Kern ab und wurde mit Hilfe der von Pavlovsky [11] aufgestellten Gleichungen für ein Beispiel eines 30,5 m hohen Dammes mit einer durchschnittlichen Kernbreite von 6,1 m errechnet. Wie Bild 11 verdeutlicht, wird die Sickerlinie für Durch-

$H_i$  = Absenkung<sup>6)</sup>; 120 ft (36,6 m)

$F\left(\frac{H}{H_i}\right)$  = Funktion aus Höhe der Sickerlinie und Höhe der Absenkung (Diagrammen in [12] entnommen)

(Anmerkung: In diesem Abschnitt wurde die Maßeinheit des Originals in ft mit aufgeführt. Die Formel für  $t$  kann aber auch unmittelbar für die Maßeinheit in m benutzt werden. Allerdings ist für eine Berechnung von  $t$  nicht ohne die Angaben in [12] auszukommen. Aus Fig. 6 in [12] ergibt sich z. B. mit den Größen des Bildes 12 und für  $H/H_i = 0,60$  ein  $F(H/H_i)$  von 0,60 und für  $H/H_i = 0,20$  ein  $F(H/H_i)$  von 6,0. — Es ist darauf hinzuweisen, daß die in Bild 12 oben angegebenen %-Werte als Absenkbetrag zu verstehen sind, also z. B. 40 % entsprechend  $H/H_i = 0,60$ . — Man beachte überdies, daß das in Bild 12 rechts für die Dammhöhe eingetragene  $H$  nicht mit der in der Formel ebenfalls mit  $H$  bezeichneten größten Höhe einer Sickerlinie identisch ist. — Anstelle des Wertes von 50 % in Bild 12, der hier entsprechend dem Original wiedergegeben ist, muß es offenbar 60 % heißen.)

Die Gleichung gilt für homogene Erddämme auf undurchlässigem Untergrund. Die den verschiedenen Faktoren zugeordneten Werte sind in dem folgenden Beispiel zur Anwendung der Formel benutzt worden. Eine Auswertung für die zur Teilabsenkung der Sickerlinie erforderliche Zeit und die Eintragung für vier Stufen der Absenkung  $H/H_i$  enthält Bild 12. (Anmerkung: Die einzelnen Punkte der Sickerlinien wurden offenbar nach der Mittelpunktsgleichung einer Ellipse eingerechnet; siehe auch [12], Gleichung 9.)

Für einen Erddamm aus sehr feinem Sand und Schluff mit einem  $k$ -Wert von 35 ft (10,7 m) je Jahr betrug die Zeit für eine Senkung der Sickerlinie um 40 % der Gesamtabenkung 300 Tage; sie betrug rd. 8 Stunden für einen Sand mit einem  $k$ -Wert von  $3,5 \cdot 10^4$  ft

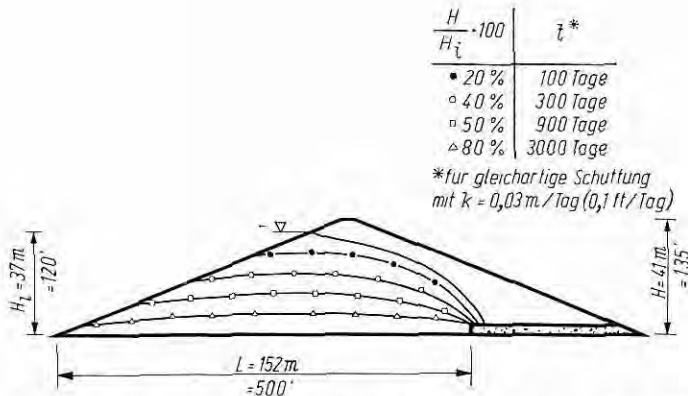


Bild 12 Nichtstationärer Strömungszustand bei raschem Absenken (Anmerkung: Das  $H$  in  $H/H_i$  der Legende gilt für den höchsten Punkt der Sickerlinien)

<sup>6)</sup> Anmerkung: Absenkung des Vollstaus.

( $1,07 \cdot 10^4$  m) je Jahr. Die Durchlässigkeitsziffern  $k$  in diesem Beispiel dienen lediglich zur Erläuterung der Berechnungsart; sie sind nicht repräsentativ für die Bodentypen, die in einem 150 ft (45,7 m) hohen Damm zur Verwendung kommen sollen.

Für einen Damm mit den in Bild 12 aufgeführten Abmessungen und einer Böschung mit einem  $k$ -Wert von  $3,5 \cdot 10^3$  ft ( $1,07 \cdot 10^3$  m) je Jahr beträgt die Wassermenge  $Q$ , die von der Mitte des Damms in Richtung Oberwasserböschung abfließt, rd. 340 cuft (9,62  $m^3$ ) je Tag, wenn die Sickerlinie um 20% gesenkt wird. Die größte Abflußmenge von 360 cuft (10,18  $m^3$ ) je Tag wurde bei einer Senkung der Sättigungslinie von 20 auf 40% festgestellt.

Diese größte Abflußmenge wird für den Entwurf der Filterschicht entsprechend der Gleichung

$$A = \frac{Q L}{t h k}$$

zugrunde gelegt. (Anmerkung:  $A$  ist die Dicke der Filterschicht in ft. — Die Abflußmenge  $Q$  gilt, wie aus [12] hervorgeht, für die Maßeinheit der Dammlänge, also für 1 ft. Damit ergibt sich für die Dicke der Filterschicht in m

$$A = \frac{Q L}{0,305 t h k} .)$$

Die Druckhöhe  $h$  beträgt in diesem Beispiel 10 ft (3,05 m), was nicht überzogen ist. Für die Filterdecke wird Sand und Kies mit einem  $k$ -Wert von  $3,5 \cdot 10^6$  ft ( $1,07 \cdot 10^6$  m) je Jahr gewählt. Die Länge des Filters  $L$  beträgt rd. 350 ft (107 m) und  $Q/t$  ist 360 cuft (10,18  $m^3$ ) je Tag. Damit ergibt sich die Dicke der Filterschicht ( $A$ ) an der Oberwasserböschung zu rd. 1,3 ft (40 cm). Jedoch kann aus konstruktiven Gründen eine Mindestdicke von 2 bis 3 ft (61 bis 92 cm) erforderlich werden.

Der Bestand eines Böschungsschutzes aus Boden-Zement-Verfestigung ohne Filterschicht ist für Erddämme gewährleistet, wenn die Betriebsbedingungen ein plötzliches Absenken ausschließen, das größeren Druck erzeugt als vom Gegengewicht der Boden-Zement-Verfestigung ausgeglichen werden kann. Wenn mit einem plötzlichen Absenken zu rechnen ist, wird eine Filterschicht für alle Arten von Böschungsschutz erforderlich. Der Böschungsschutz aus Boden-Zement-Verfestigung, der über der Filterschicht eingebaut wird, schützt diese vor dem Verstopfen durch Feststoffe des Wassers, auch wird sie so gegen Verschieben durch Wellenschlag gesichert.

### Zementverfestigte Dämme

Die Zementverfestigung der gesamten Dammschüttung kann zu einer großen Materialeinsparung führen. Die wesentlich höheren Druck- und Scherfestigkeiten der Böden, die auch nur mit geringen Zementmengen verfestigt wurden, können durch die Anwendung steilerer Böschungen genutzt werden. Dies führt zu einer Verringerung des Materialumschlags und -einbaus sowie zu kür-

zerer Bauzeit. Weitere Vorteile liegen in der Verkürzung der Umlauf- und Überlaufbauwerke. Außerdem wäre ein Überspülen bei plötzlich auftretenden Überschwemmungen während der Bauzeit oder später im Betrieb nicht so folgenschwer wie bei einem Damm aus unverfestigten Böden.

### Triaxialfestigkeit

Die Triaxialversuche wurden an Zylindern 7,1/14,2 cm durchgeführt, die bei optimalem Feuchtigkeitsgehalt auf Normdichte [8] verdichtet worden waren. Die Proben wurden in einer Nebelkammer bei 22 °C nachbehandelt und dann, nicht entwässert, mit einer solchen Belastungsgeschwindigkeit geprüft, daß der Versuch in rd. 10 Minuten abgeschlossen war. Auch bei den niedrigsten Zementgehalten betrug die gesamte Bruchverformung weniger als 2 %. Ergebnisse der Triaxialversuche mit den unbehandelten und mit Zement verfestigten Böden A-1-b, A-2-4 und A-4 enthalten die Tafeln 5 und 6. Im Vergleich zu den unbehandelten Böden wiesen die verfestigten Böden eine wesentliche Erhöhung der inneren Reibung und der Kohäsion auf. Die Kohäsion stieg mit dem Zementgehalt und mit der Nachbehandlungszeit an. Verglichen mit den unbehandelten Böden nahm auch der Winkel der inneren Reibung bei den verfestigten Böden erheblich zu. Jedoch wurden nur kleine Änderungen mit zunehmender Zementmenge festgestellt. Bei Erwägungen über Böschungsneigung und Standfestigkeit ist die Erhöhung der Kohäsion durch höhere Zementgehalte bedeutsam.

Die Ergebnisse der Triaxialversuche im Alter von 28 Tagen wurden zur Berechnung des zulässigen Böschungswinkels  $i$  für ze-

Tafel 5 Triaxialfestigkeit und Zementgehalt nach 28tägiger Nachbehandlung

Boden	Zementgehalt in Gew.-%	Kohäsion kp/cm <sup>2</sup>	Reibungswinkel Grad *)
A-2-4	0	1,4	29
	2	3,5	41
	3	4,1	44
	4	4,9	44
	6	6,3	48
	8	7,0	49
A-1-b	0	0,7	38
	1	1,9	45
	2	2,6	49
	3	3,5	51
	4	5,0	52
	5	6,7	55
A-4	0	0,3	37
	2,5	2,1	46
	5,5	4,6	45
	7,5	6,0	45
	9,5	8,8	45

\*) Anmerkung: 360°-Kreisteilung



Tafel 6 Triaxialfestigkeit und Dauer der Nachbehandlung

Boden	Zementgehalt Gew.-%	Alter Tage	Kohäsion kp/cm <sup>2</sup>	Reibungswinkel Grad *)
A-2-4	2	7	0,7	43
	2	28	3,5	41
	2	90	2,8	40
	6	7	5,3	48
	6	28	6,3	48
	6	90	6,7	53
A-1-b	1	7	0,8	47,5
	1	28	1,9	45,5
	1	90	2,5	45,5
	3	7	2,3	49
	3	28	3,5	51
	3	90	5,9	46
A-4	2,5	7	1,8	43
	2,5	28	2,1	46
	2,5	90	3,9	42
	5,5	7	2,5	48
	5,5	28	4,6	45
	5,5	90	7,0	41

\*) Anmerkung: 360°-Kreisteilung

mentverfestigte Dämme benutzt. Der Böschungswinkel wurde für den Stau berechnet und für eine einfache Böschung mit kreisförmiger Rutschfläche <sup>7)</sup> bei einem Sicherheitsfaktor von 3 für den Reibungswinkel und von 6 für die Kohäsion ausgewertet. Die Beziehungen zwischen Böschungswinkel und Zementgehalt werden in Bild 13 wiedergegeben. Man sieht, daß bei einer Bodenverfestigung mit nur 2 Gew.-% Zement der zulässige Böschungswinkel für die Böden A-1-b und A-2-4 rd. 54 ° und für den Boden A-4 rd. 38 ° beträgt. Mit diesen Verhältnissen wurde der Materialbedarf für einen 46 m hohen Damm im Vergleich zu einem Damm aus unverfestigtem Boden mit einer 3 : 1-Böschung errechnet. Aus Bild 14 geht hervor, daß die in einem Dammschnitt eingebaute und verdichtete Materialmenge um 60 bis 70 % verringert werden kann, wenn die hier verwendeten Bodentypen mit 2 Gew.-% Zement verfestigt werden.

### Folgerungen

1. Ein großer Bereich von zementverfestigten Böden wurde mit Erfolg für den Böschungsschutz bei Erddämmen verwendet. Die vorliegende Untersuchung zeigt auch, daß feinkörnige, nichtplastische Böden dort verwendet werden können, wo geeignetere Böden nicht zur Verfügung stehen und wirtschaftliche Überlegungen es gestatten, die für die Beständigkeit und den Erosionswiderstand erforderlichen größeren Zementmengen anzuwenden.
2. Der Zementbedarf kann entsprechend dem Umwelteinfluß für die verschiedenen Zonen einer Dammverkleidung verschieden an-

<sup>7)</sup> Anmerkung: Gemeint ist eine kreiszylindrische Gleitfläche.

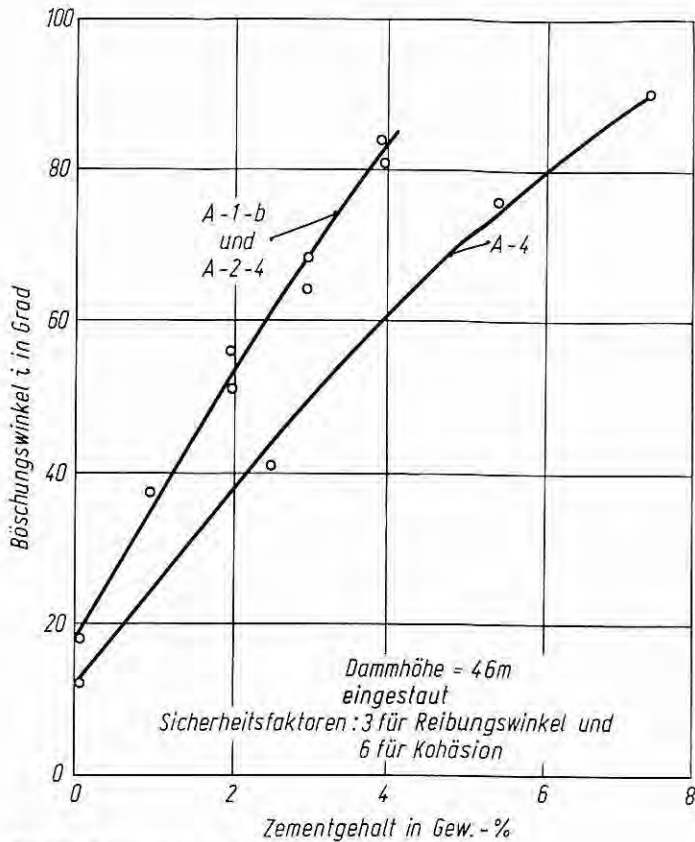


Bild 13 Zulässige Neigungen für zementverfestigte Dämme

gesetzt werden. Der Bedarf für Flächen, die in der Spritzwasserzone Frost ausgesetzt sind, liegt rd. 2 % über dem, der sich nach den Normprüfungen ergibt [6, 7]. Der Frosteinwirkung unterliegende Partien oberhalb der Spritzwasserzone können mit der Zementmenge verfestigt werden, die nach den Normprüfungen erforderlich werden. Für Partien ohne Frosteinwirkung kann der Zementgehalt rd. 2 % weniger betragen, als die Normprüfungen verlangen, jedoch nicht weniger als insgesamt 2 %.

3. Für eine Boden-Zement-Verfestigung in Bereichen mit starker, geschiebeführender Strömung sollte der Zementgehalt 2 % über der Mindestmenge liegen, die nach den Normprüfungen erforderlich wird. Außerdem sollte der gewählte Boden einen Kiesanteil von über 20 % aufweisen. Bei geschiebefreier Strömung, wie z. B. bei Kanalverkleidungen, kann die Mindestzementmenge nach den Normprüfungen angesetzt und Boden ohne Kiesanteil verwendet werden.

4. Für Böschungsverkleidungen aus Boden-Zement-Verfestigung wurden Einflußgrößen für den Wellenauflauf erhalten. Böschungs-

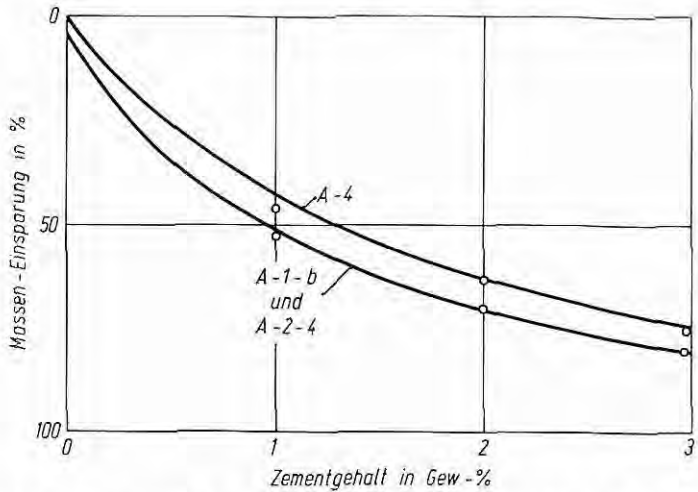


Bild 14 Vermindertes Dammvolumen bei Verwendung zementverfestigter Böden

profile mit scharfkantigen Stufen hemmten den Wellenauflauf am stärksten. Die Wellenauflaufwerte für eine Betonböschung waren rd. 1,5mal größer als die für scharfkantige, abgetreppte Oberflächen. Der Wellenauflauf ist für steile Böschungen höher als für flachere. Scharfkantige Stufen aus körnigen Böden können mit einer Rüttelplatte und einer Gleitschalung hergestellt werden.

5. Die Durchlässigkeit der Böden, die im allgemeinen für die Dammverkleidung verwendet werden, wird merklich herabgesetzt, wenn sie mit Zement verfestigt werden. Das Durchsickern von Wasser an der Verbindungsfläche von zwei Lagen wird vermindert, wenn die Verdichtungsfläche der unteren Lage bis zu einer Tiefe von mindestens 1,3 cm aufgeritzt und das lose Material vor dem Aufbringen der nächsten Lage abgeräumt wird. Eine dünne Schicht Zementschlämme zwischen den Lagen verringerte das Durchsickern. Die Sickermenge war nur noch so groß wie bei Durchlässigkeitsprüfungen mit rechtwinklig auf die Verdichtungsfläche wirkendem Wasserdruck.

6. Schwindrisse in zementverfestigten Oberwasserverkleidungen erhöhen das Durchsickern durch den Damm nicht wesentlich. Abdichtungen sollten bis in durchlässige Untergrundschichten herabgeführt werden.

7. Die Triaxialfestigkeit und damit die Widerstandsfähigkeit der Dammböschungen aus zementverfestigten Böden erhöhen sich mit dem Zementgehalt und dem Alter. Im Vergleich zu unbehandelten Böden nahmen der Winkel der inneren Reibung und die Kohäsion wesentlich zu, auch dann, wenn geringe Zementmengen verwendet wurden.

8. Das Dammvolumen kann vermindert werden, wenn der gesamte Damm aus Böden errichtet wird, die mit geringen Zementmengen verfestigt werden.

## SCHRIFTTUM

- [1] Catton, M. D.: Early soil-cement research and development. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Journal Highway Division, 85 (1959) S. 1/16.
- [2] Felt, E. J., und M. S. Abrams: Strength and elastic properties of soil-cement mixtures. ASTM Spec. Techn. Publ. No. 206, Amer. Soc. Test. Mat., 1957, S. 152/178.
- [3] Soil-Cement Slope Protection for Earth Dams: Construction. Portland Cem. Assoc., Skokie, Ill., 1967.
- [4] Holtz, W. G., und F. C. Walker: Soil-cement as slope protection for earth dams. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Journal Soil Mechanics and Foundations Div., 88 (1962) S. 107/134; und „Discussions“ by E. P. Sellner 89 (1963) S. 220.
- [5] Amer. Assoc. State Highway Officials Publication No. M 145.
- [6] ASTM Standards; (a) ASTM D 559-57, 1965: Wetting-and-drying test of compacted soil-cement mixtures; (b) ASTM D 560-57, 1965: Freezing-and-thawing tests of compacted soil-cement mixtures; (c) ASTM D 1632-63: Making soil-cement specimens in the laboratory.
- [7] Soil-Cement Laboratory Handbook. Portland Cem. Assoc., Chicago 1959, S. 28/31.
- [8] ASTM Standard D 558-57, 1965: Moisture density relations of soil-cement mixtures.
- [9] Saville, Th. jr., E. W. McClendon und A. L. Cochran; Freeboard allowances for waves in inland reservoirs. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Waterways and Harbors Division, 1962, S. 93/124.
- [10] Cedergren, H. C.: Seepage, Drainage and Flow Nets. John Wiley & Sons, New York 1967, S. 213.
- [11] Pavlovsky, N. N., und R. N. Davidenkov: The percolation of water through earthen dams. I. Congrès des Grands Barrages, Stockholm 1933, Vol. 4, S. 193/208. (Selbstverlag der „Commission Internationale des Grands Barrages de la Conférence Mondiale de l'Énergie, Paris 1933).
- [12] Brownin, B. S.: Nonsteady-state flow in homogeneous earth dam after rapid drawdown. Proc. Fifth Intern. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1961, Vol. 2, S. 551/554 (Dunod, Paris).