

SCHULZ, H. und KÖHLER, H.-J., Bundesanstalt für Wasserbau, BRD

**BEMESSUNG VON DECKWERKEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON GEOTEXTILIEN**  
**USE OF GEOTEXTILES IN HYDRAULIC CONSTRUCTIONS IN THE DESIGN OF REVETMENTS**  
**DIMENSIONNEMENT DE REVETEMENTS DE RIVE EN CONSIDERATION DE GEOTEXTILES**

Mit der Einführung von Geotextilien haben sich neuartige Deckwerksbauweisen entwickelt, die im Unterschied zu den klassischen Verfahren der auf Kornfilterschichten gebetteten losen Steinschüttung in immer stärker anwachsendem Maße zu den auf geotextilen Filtern aufgelegten Verbundbauweisen führte. Hierbei kann das Geotextil neben der Filterfunktion auch eine statische Funktion erfüllen, wenn es vollflächig und eben auf der Böschung aufliegt und oberhalb der Wasserwechselzone ausreichend verankert ist. Die Kriterien für die Bemessung eines solchen Deckwerks wurden für den Belastungsfall der schnellen Spiegelsenkung sowohl für den Bereich der Hangquelle als auch für den Böschungsbereich unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels für die jeweils geltenden Druckgradienten hergeleitet. Dabei wurden vereinfachende, für die Dimensionierung jedoch überaus wichtige Annahmen über den Druckabbau des Porenwassers in der Böschung als Folge der schnellen Spiegelsenkung getroffen. Das Bemessungskonzept erlaubt zutreffende Standsicherheitsabschätzungen von Deckwerken.

### 1. Einleitung

Ein natürliches Ufer an einem Gewässer stellt sich infolge der Wellenbewegungen unter einem sehr flachen Böschungswinkel so ein, daß die Bedingungen des Grenzgleichgewichts erfüllt sind. Bei einem bindigen Boden können senkrechte Böschungen nur so lange standsicher bleiben, so lange eine Kohäsion wirksam ist. Im allgemeinen kann jedoch am Übergang zwischen der Wasser- und Böschungsoberfläche bei den wenigsten Böden eine auf Dauer vorhandene Kohäsion unterstellt werden. Deshalb brechen solche Ufer schollenförmig und verflachen nach dem Abbruch im Wasserwechselfeld zu einem nahezu horizontalen Strand. Dieses Verhalten kann in allen natürlichen Gewässern beobachtet werden.

Fließende Gewässer verändern aufgrund der ihnen innewohnenden Erosionskraft ihr Bett im Laufe der Zeit, so daß zum Schutze von Kulturland schon frühzeitig Befestigungen der Ufer von Gewässern vorgenommen werden mußten. Die Ufer von schiffbaren Wasserstraßen sind verstärkten Beanspruchungen aus der Verdrängungsströmung durch das fahrende Schiff unterworfen. Neben der Rückströmgeschwindigkeit ist hier insbesondere der relativ schnelle Wasserspiegelabsenk eine der wesentlichen Belastungen, die den Bestand der unter Wasser liegenden Böschungsbereiche besonders stark gefährden. Soweit diese Ufer im unmittelbaren Einflußbereich solcher schiffbedingten Wasserbewegungen liegen, ist es zwingend erforderlich, ausreichend standsichere Böschungsbefestigungen anzulegen.

In diesem Beitrag sollen einige Gedanken vorgestellt werden, die bei der Bemessung von Uferbefestigungen als maßgebend angesehen werden und einen direkten Bezug zur Anwendung von Geotextilien im Deckwerksbau besitzen.

With the introduction of geotextiles novel methods of bank protection have been developed away from the classical methods of loose stone rubble on grain particle filter layers increasingly to geotextiles connected by bonded revetment layers. In this way geotextiles fulfill not only a filter function but could also have a static function when they lie evenly and as an entity on the embankment and are sufficiently anchored above the water exchange area. The criteria for the construction of such bank protections were calculated on the loads which arise through the rapid draw down of the water level not only on the slope spring area but also underneath the lowered water level for the respective instantaneous valid water pressure in the subsoil. Simplified but for the dimensioning important approximations were made about the reduction of pore water pressure as a result of the rapid draw down. The design concept allows for accurate calculations of safety factors on embankment constructions.

### 2. Deckwerksbauweisen

Die Entwicklung der Deckwerksbauweisen kann in sehr einfacher Form etwa wie folgt skizziert werden: Ein Ufer, welches durch Erosion infolge von Wasserbewegungen bedroht war, wurde früher zumeist durch den sogenannten Steinbewurf gesichert. Dabei war die Vorstellung maßgebend, daß die Steine aufgrund ihrer Korngröße und ihres Gewichtes den Erosionskräften standhalten können. Die praktischen Erfahrungen mit diesen Deckwerken waren jedoch von einem erheblichen Unterhaltungsaufwand gekennzeichnet, der aus dem laufenden Nachschütten dieser Steine bestand und häufig erst dann nachließ, wenn diese Deckwerke durch die notwendigen Nachtragsschüttungen teilweise Mächtigkeiten von mehr als 2 m erreicht hatten. Solche aufwendigen Unterhaltungsarbeiten hatten dabei häufig ihre Ursache in der fehlenden Filterstabilität zwischen Untergrund und Steinschüttung, sei es, daß die Mängel schon im Entwurf begründet waren oder schlichtweg in unsachgemäßer Ausführung der Deckwerkssicherung zu suchen waren.

Als mit dem Einbau von abgestuften Kornfilterschichten unter dem Schüttsteindeckwerk begonnen wurde, war eine wichtige Grundlage für den Bau von unterhaltungsarmen Böschungssicherungen geschaffen. Probleme traten jedoch immer wieder dort auf, wo die Kornfilter unter Wasser einzubauen waren. Die häufig nicht beachtete Entmischung der unter Wasser eingebauten Körnungen wirkte sich wiederum nachteilig auf die Stabilität der Deckschichten aus, weil beim Entmischungsvorgang die angestrebte Filterwirkung zwischen Deckwerk und Untergrund verloren ging. Dieses Problem konnte nur dadurch umgangen werden, in dem man sehr gleichförmige Filterkörnungen in mehreren Stufen einbaute, was wiederum zu hohen Herstellungskosten führte. Mit dem Erscheinen der geotextilen Filter schien das Filterproblem im Deckwerksbau gelöst zu sein. Man ersetzte den Kornfilter durch einen

getextilen Filter und baute die Deckwerke aus losen Schüttsteinen in gleicher Weise wie unter Verwendung von Kornfiltern auf. Durch den Wegfall der Kornfilterschichten wurden die Deckwerke insgesamt leichter und waren gegen die zudem ständig anwachsenden Beanspruchungen aus der Schifffahrt nicht mehr ausreichend standsicher. Dies äußerte sich in erster Linie in vermehrt auftretenden Deckwerksverformungen, in deren Folge sich häufig die völlige Zerstörung der Deckwerke durch Abrutschen der losen Steinschüttung auf dem geotextilen Filter einstellte. In der Folgezeit setzte deshalb eine Entwicklung hin zu den sogenannten Verbundbauweisen ein. Zum einen erreichte man diese Verbundwirkung durch einen nachträglich auf die lose Steinschüttung aufgetragenen flächenhaften Verguß. Es entstanden die teilvergossenen Schüttsteindeckwerke, in Fachkreisen hatte sich hierfür der Begriff der verklammerten Steinschüttungen eingebürgert, bei denen durch zement- oder bitumengebundene Vergußmaterialien eine flächenhafte Verbundwirkung innerhalb der Deckschicht erreicht wurde, ohne die vorhandene hohe Wasserdurchlässigkeit der ursprünglich losen Steinschüttung wesentlich herabzumindern.

Zum anderen wurden vorgefertigte Verbundsteindeckwerke unterschiedlichster Art entwickelt, bei denen Betonsteine durch entsprechende konstruktive Details zu einem flächenhaften Gebilde zusammengefaßt wurden. Damit war die Lagestabilität der obersten Schicht eines Deckwerkes gewährleistet, dennoch gab es noch immer keine standsicheren Deckwerke, weil Bodenumlagerungen unter den Geotextilien zu Verformungen und zu Hohlräumen unter den flächenhaft wirkenden Deckschichten führten und schließlich Einbrüche dieser Deckwerke zu verzeichnen waren. Dieser Erscheinung versuchte man durch den Einsatz neuartiger Geotextilien mit doppel- und mehrlagigem Schichtenaufbau zu begegnen, wobei den an der Unterseite angebrachten Zusatzschichten anfangs eine Rauheits-, später eine sogenannte Vorfilterfunktion zugeordnet wurde.

In der Tat ist man heute in der Lage, Deckwerke mit einer großen Lebensdauer herzustellen. Diese Fähigkeit beruht auf jahrelangen Versuchen im Deckwerksbau und ist zum Teil rein empirisch begründet. Vor einer allgemein gültigen Übertragung dieser teilweise guten Erfahrungen auf andere Wasserstraßen mit anderen Schifffahrtsbelastungen und Untergrundverhältnissen muß jedoch gewarnt werden, weil erneute Mißerfolge nicht auszuschließen sind, wo das harmonische Zusammenwirken von Untergrund und Deckwerk, anderen Randbedingungen folgend, nicht mehr vorausgesetzt werden kann. Eine Begründung und Bestätigung der bisher gesammelten Erfahrungen im Deckwerksbau auf einer mehr theoretischen Grundlage scheint deshalb mehr als geboten.

3. Standsicherheitskonzept

Unter dem Begriff "Standsicherheit eines Deckwerkes" soll die Fähigkeit der Böschungssicherung verstanden werden, die auf sie einwirkenden hydrodynamischen Kräfte aus der Wasserbelastung ohne Verformungen des Deckwerks selbst und/oder des Untergrundes aufzunehmen. Hierfür sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Die Gesamtstandsicherheit einer Böschung, deren oberste Schicht das Deckwerk darstellt, muß gewährleistet sein. Die hierzu erforderlichen Nachweise sind aus Vorschriften und Normen hinreichend bekannt.
- Die Stabilität der Deckwerkselemente innerhalb der obersten Deckwerkslage muß sicher erfüllt sein. Hierzu liegen ausreichend sichere Dimensionierungsgrundlagen aus modelltechnischen Untersuchungen (z.B. HUDSON-Kriterium) vor. Auch sind durch weitergehende konstruktive Maßnahmen (z.B. Verbundbauweisen) Verbesserungen des Stabilitätsgrades möglich.

- Die Standsicherheit des Böschungsuntergrundes unmittelbar unterhalb des Deckwerks muß eingehalten sein, das heißt, der Spannungszustand dieser böschungsnahen Untergrundzonen muß ausreichend weit vom Bruchspannungszustand (Mohr-Coulombsche Bedingung) entfernt bleiben.

Die erste der o.g. Bedingungen wird durch rein bodenmechanische Nachweise, z.B. entsprechend DIN 4084, erfüllt. Die zweite der o.g. Forderungen wird durch entsprechende wasserbauliche Versuche oder vorhandene Erfahrungen bzw. durch besondere konstruktive Maßnahmen sichergestellt. Die dritte Forderung bedeutet, der Vergrößerung der Schubbeanspruchung durch das bei der schnellen Wasserspiegelabsenkung aus der Böschung ausströmende Grundwasser ein ausreichend großes Gegengewicht in Form der Deckwerksauflast entgegenzusetzen, so daß die Scherfestigkeit des Böschungsbodens nicht überschritten wird und sogar eine gewisse Sicherheit gegenüber dem Grenzgleichgewichtszustand im Sinne der Felleniusregel existiert. Dieser Nachweis erfolgt nach eindeutig festzulegenden geotechnischen Regeln. Ein auf dieser Berechnungsgrundlage angewendetes Dimensionierungsverfahren wurde erstmals von Köhler (1), (1980), für praktische Untersuchungen zur Festlegung von Deckwerkskonstruktionen an schiffbaren Wasserstraßen vorgestellt und mit Erfolg angewendet. Wichtigste Eingangsgröße ist hierbei der anzusetzende Wasserdruck im Böschungsuntergrund, wie er als Folge von schnellen Wasserspiegeländerungen vor der Böschung durch die Schifffahrt ausgelöst wird. Hierzu sind eingehende Untersuchungen notwendig.

4. Die Strömungsverhältnisse im Untergrund

Sickerströmungen als Folge von Spiegelschwankungen wurden von Schnitter und Zeller (1957), (7) untersucht. Geht man von einem ausgeglichenen Wasserspiegel in der Böschung unter dem Deckwerk aus, so kann mit Hilfe der vorgelegten Untersuchungsergebnisse die Lage der Hangquelle als Folge einer schnellen Spiegelsenkung ermittelt werden, sofern die Durchlässigkeit des durchströmten Körpers selbst einen verzögerungsfreien Absink zuläßt. Als Hangquelle wird diejenige Fläche auf der Böschung bezeichnet, die unterhalb des Austrittspunktes B der Sickerlinie liegt. Im Bereich der Hangquelle verlaufen die Stromlinien nahezu böschungsparell und erzeugen die größten stömungsbedingten Schubspannungen (vergleiche Bild 1).

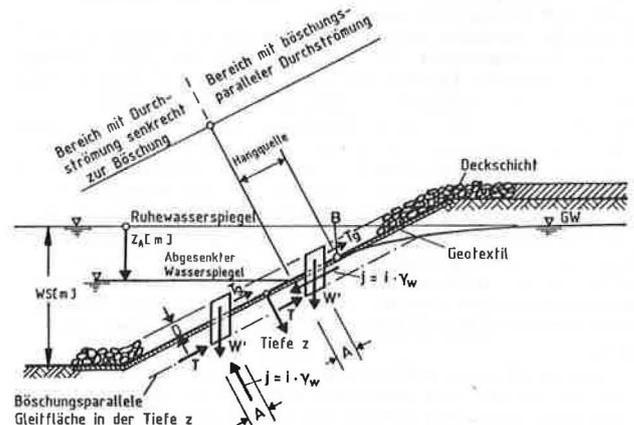


Bild 1 : Böschungselemente

Unterhalb des Außenwasserspiegels ist die Böschungsoberfläche eine Potentialfläche. Bei schnellen Spiegelsenkungen vor der Böschung kann der Wasserspiegel im Böschungsuntergrund in Abhängigkeit von der vorhandenen Wasserdurchlässigkeit  $k$  des Böschungsbodens nur in verzögerter Form folgen. Es entsteht eine instationäre Potentialströmung, deren Stromlinien im Böschungsbereich unter dem abgesenkten Außenwasserspiegel senkrecht zur Austrittsfläche, das heißt hier senkrecht zur Böschungsneigung gerichtet sind. Das aus dem Potentialabbau resultierende Gefälle reduziert damit die Normalspannung in böschungsp parallelen Flächen. Die Schubspannung aus der Eigenlast des Bodens bleibt hiervon unbeeinflusst und reduziert sich nicht. Damit wird das Schubspannungsniveau im Untergrund erhöht und die Sicherheit gegen Abgleiten erniedrigt. Bei der Bemessung von Deckwerken muß deshalb dieser Belastungsfall ganz besonders beachtet werden, weil durch den senkrecht zur Böschungsoberfläche austretenden Druckgradienten in der Regel eine weitaus geringere Sicherheit gegen Abgleiten auf böschungsp parallelen Flächen besteht als es sich nach dem allgemein bekannten Belastungsfall der böschungsp parallelen Durchströmung ergibt.

Während die böschungsp parallele Strömung ein reines Problem der Böschungsgeometrie darstellt, ist die nach außen gerichtete Strömungskraft sehr viel schwieriger zu beschreiben. Bei einer gleichmäßigen Spiegelsenkung könnte der daraus resultierende, nach außen gerichtete Gradient auch über eine eindimensionale Betrachtung, analog zur Konsolidationstheorie, ermittelt werden. Tatsächlich aber treten in Wasserstraßen zweidimensionale Wasserbewegungen auf, die zu einem dreidimensionalen Porenwasserdruckfeld im Untergrund führen. Die mathematische Beschreibung dieser allgemeinen Form des Porenwasserdruckfeldes in einer Böschung liegt für diesen Belastungsfall noch nicht vor. Für Gewässersohlen sind geschlossene Lösungen für das zweidimensionale System bekannt, die z.B. im Zusammenhang mit der Absperrung der Osterschelde erarbeitet wurden (Barden, 1979, de Groot und Sellmeijer, 1979), (2), (3). Die mathematische Beschreibung des Vorgangs wird noch zusätzlich dadurch erschwert, daß sich die Kompressibilität des lufthaltigen Porenwassers während des Absinkvorganges ändert. Hierzu wurden in der BAW Versuche eingeleitet, die für den eindimensionalen Betrachtungszustand zu einer näheren Beschreibung des Druckverlaufes mit Hilfe einer Exponentialfunktion geführt haben (Köhler, 1980), (4). Im Vergleich mit der linearen Konsolidationstheorie konnten in einer zuletzt durchgeführten Versuchsreihe die aus den anfänglichen Untersuchungen gezogenen Schlußfolgerungen bestätigt werden, daß der zeitliche Verlauf des Porenwasserdruckausgleichs nach einer schnellen Druckminderung stark von der ständigen Veränderung der Kompressibilität des lufthaltigen Porenwassers abhängt (Schneider, 1985), (5). Geht man von der ersten Näherung aus, daß die Wasserspiegelabsenkung als Folge eines fahrenden Schiffes weitgehend richtig als eindimensionales Ereignis dargestellt werden kann, so darf auch der instationäre Strömungszustand im Untergrund als eindimensionales Problem behandelt werden. Damit läßt sich die zeitliche und örtliche Druckänderung im Untergrund durch folgende Funktion annähern:

$$p(t, z) = z_A \cdot \gamma_W \cdot (1 - e^{-\mathcal{E}(t) \cdot z}) \quad (1)$$

$$\text{mit } (t) = K \cdot (c_v(t) \cdot t)^{-1/2}$$

In Gleichung (1) bedeutet  $z$  die Tiefenordinate normal zur Böschungsoberfläche, positiv in Richtung Böschungstiefe gezählt,  $t$  die Zeit nach Eintritt der plötzlichen Spiegelabsenkung um den Betrag  $z_A$ .  $\mathcal{E}(t)$  beschreibt die Porenwasserdruckveränderung im Laufe der Zeit. Dabei ist  $c_v$  der Konsolidierungsbeiwert, der wegen der variablen Kompressibilitäten der beiden beteiligten Porenmedien

Wasser und Luft hier jedoch veränderlich ist.  $K$  ist eine Proportionalitätskonstante, die ggf. auch mit  $t$  veränderlich ist. Da die Korrelation praktischer Ergebnisse mit diesem theoretischen Ansatz nicht sehr befriedigend ist, wird im folgenden auf den Näherungsansatz der Exponentialfunktion zurückgegriffen:

$$\Delta p(t, z) = z_A \cdot \gamma_W \cdot a(t) \cdot e^{-b(t) \cdot z} \quad (2)$$

Dabei stellen  $a(t)$  und  $b(t)$  Funktionen dar, die aus Versuchsergebnissen über Regressionsanalysen aus der Exponentialfunktion gewonnen wurden. Die Bilder 2 und 3 geben die Kurvenverläufe der beiden Größen für einen bestimmten Boden wieder.

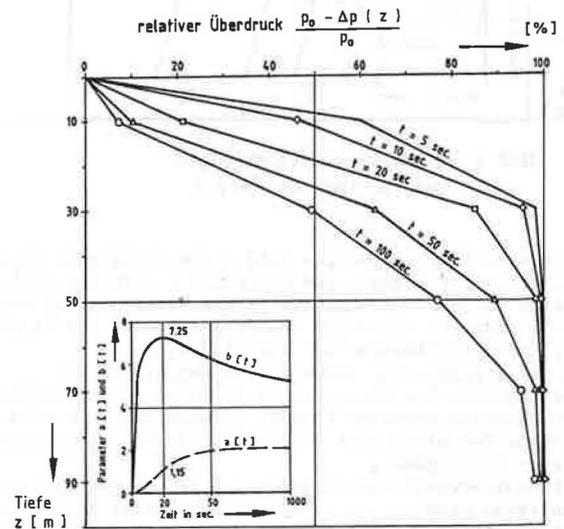


Bild 2 : Bezogene Druckänderungen als Funktion der Tiefe z

Bild 2 zeigt das Ergebnis einer im Versuch durchgeführten schnellen Druckminderung in einem Versuchszylinder mit einem Durchmesser von 47 cm für die Simulation einer schnellen Spiegelsenkung  $z_A$  um den Betrag von 85 cm in einem Zeitraum von  $t = 20$  sec. Das untersuchte Material bestand aus einem schwach ungleichförmigen Mittelsand mit einem Ungleichförmigkeitsgrad  $C_u = 5,9$  und einem wirklichen Korndurchmesser  $d_{10} = 0,116$  mm. Bild 3 zeigt die Kurven aus einem Versuch mit einem sehr gleichförmigen Mittelsand ( $C_u = 1,5$  und  $d_{10} = 0,336$  mm) bei einer Absenkhöhe  $z_A = 65$  cm innerhalb einer Zeit von  $t = 10$  sec. Dividiert man Gleichung (1) durch  $\gamma_W$  und differenziert zum Zeitpunkt  $t = \text{const}$  nach  $z$ , so erhält man das in der Tiefe  $z$  herrschende örtliche hydraulische Gefälle  $i$  infolge des schnellen Wasserspiegelabsinks zum betrachteten Zeitpunkt  $t$ :

$$i = \mathcal{E} \cdot z_A \cdot e^{-\mathcal{E} \cdot z} \quad (3)$$

Unter Bezugnahme auf die empirische Darstellung der Zeitabhängigkeit des Absenkungsvorganges nach Gleichung (2) ergibt sich der örtliche Gradient (4) zu:

$$i = b(t) \cdot z_A \cdot a(t) \cdot e^{-b(t) \cdot z} \quad (4)$$

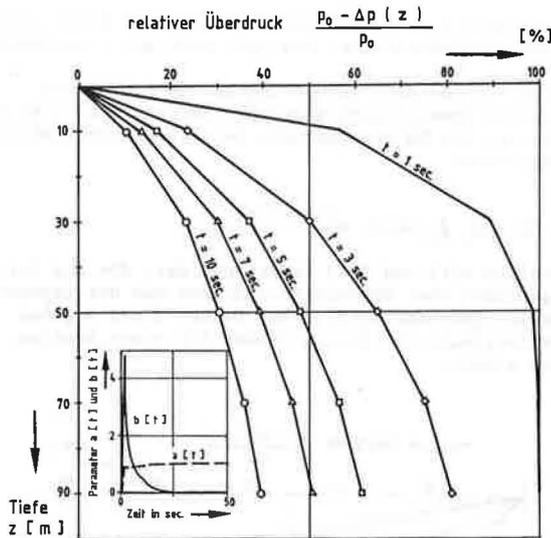


Bild 3 : Bezogene Druckänderungen als Funktion der Tiefe z

Setzt man beispielsweise aus Bild 2 die im Versuch ermittelten Werte für a und b zum Zeitpunkt t = 20 sec nach Beginn des Absenkungsvorganges in die Gleichung (4) ein, so erhält man für den örtlichen Gradienten in der Tiefe z = 0,1 m beispielsweise den Wert i = 3,43.

An diesem Ergebnis ist leicht zu erkennen, daß die Beanspruchungen des Korngerüstes im Untergrund erhebliche Größenordnungen annehmen können. In noch größerem Maße gilt diese Feststellung für alle Böden mit noch geringerer Wasserdrucklässigkeit.

Bei Standsicherheitsberechnungen ist jedoch der mittlere hydraulische Gradient zu verwenden, der jeweils zwischen der betrachteten Tiefe z und der Oberfläche der Böschung wirksam ist. Die Integration von Gleichung (3) führt auf mathematisch aufwendige Integralexponentialfunktionen, so daß es ausreichend genau erscheint, den mittleren Gradienten  $i_m$  wie folgt darzustellen:

$$i_m = \frac{p(t,z)}{i_w \cdot z} = \frac{z_A(1 - e^{-\epsilon(t) \cdot z})}{z} \quad (3a)$$

bzw.

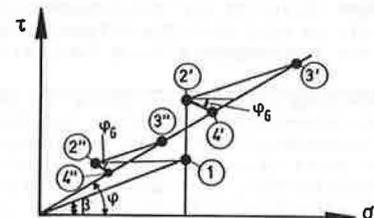
$$i_m = \frac{p(t,z)}{i_w \cdot z} = \frac{z_A(1 - a(t) \cdot e^{-b(t) \cdot z})}{z} \quad (4a)$$

Die Gleichung (4a) wird später bei der Standsicherheitsberechnung von Deckwerken benötigt.

5. Wirkungsweise von Geotextilien

Bei der Behandlung der örtlichen Standsicherheit einer luftseitigen Dammböschung hat Schulz (1984), (6), dargestellt, in welcher Form ein Geotextil auf den Spannungszustand eines Bodenelementes in einer Böschung einwirkt. Für diese Berücksichtigung des Geotextiles in der Gleichgewichtsbetrachtung wird unterstellt, daß das Geotextil ebenflächig aufliegt und in der Lage ist, Zugkräfte in höhergelegene Teile der Überwasserböschung zu übertragen. Diese für die Berechnung notwendige Annahme muß für die Bauausführung als eine unbedingt einzuhaltenen Voraussetzung gefordert werden. Da der geotextile

Filter durch das Deckwerk belastet wird, wirken auf das unmittelbar unter dem Geotextil befindliche Bodenelement Normalspannungen ein. Infolge der Rauigkeit des Geotextils wird eine Schubspannung auf den Boden übertragen, sobald es infolge der Wasserdruckverhältnisse zu Bewegungen von einzelnen Bodenelementen in Böschungsfalldirection kommt. Der Ansatz dieser zusätzlichen Reibungskraft als eine der Böschungsrutschung entgegenwirkende Haltekraft parallel zur Böschungsebene ist also nur dort berechtigt, wo geringe Verformungen des Böschungsuntergrundes ohne Risiko hingenommen werden können, um anschließend eine der Standsicherheit des Deckwerks zu gute kommende Haltekraft zu etablieren. Durch diese Mobilisierung von Reibung unterhalb des Geotextils ist es möglich, den Spannungszustand eines Bodenelementes mit Hilfe einer wesentlich kleineren Auflast unterhalb des Grenzspannungszustandes zu halten als ohne den Einsatz eines Geotextils (siehe Bild 4).



- ① Spannungszustand in einer Böschung ohne Grundwasserströmung
- ② Spannungszustand mit Grundwasserströmung parallel zur Böschung
- ②' Spannungszustand mit Grundwasserströmung senkrecht zur Böschung
- ③' } Spannungszustand nach Belastung durch die Deckschicht ohne Geotextilunterlage
- ④' }
- ④' } Spannungszustand nach Belastung durch die Deckschicht mit Geotextilunterlage

Bild 4: Spannungszustände

Für die Wirkungsweise von sogenannten Zusatzschichten als unterste Lage von mehrschichtig hergestellten Geotextilien soll folgendes Gedankenmodell vorgestellt werden, (spezielle Fragen von geschichteten und inhomogenen Untergrundverhältnissen sollen bei dieser Überlegung vorerst unberücksichtigt bleiben):

Zunächst liegt das Geotextil mit seiner Zusatzschicht auf der Böschung auf. Die Auflast aus der darüberliegenden Deckschicht bewirkt in Abhängigkeit von Kornauflage, von der Lagerungsdichte oder Konsistenz des darunterliegenden Bodens eine mehr oder minder eintretende Eindrückung in die oberste Bodenschicht. Kann dieser Zustand nicht direkt durch die statisch einwirkende Deckwerkslast erreicht werden, so ist die unter Schiffahrtsbelastung liegende Deckschichtlage ständig wiederkehrenden Spiegelschwankungen ausgesetzt. Die hierdurch auf den Böschungsboden einwirkenden dynamischen Belastungen aus der instationären Potentialströmung versetzen die noch nicht ausreichend durch die aufliegende Deckwerkslast gehaltenen Bodenbereiche in einen wiederholt eintretenden und örtlich begrenzt wirkenden Bruchspannungszustand. Bei Vorliegen von rolligen Bodenmaterialien wird es hierdurch unmittelbar zu Bodenumlagerungen, d. h. zu Verformungen des Untergrundes kommen, bis der durch die Zusatzschicht angebotene Porenraum ausreichend mit Bodenmaterial aufgefüllt wurde. Weitergehende Kornbewegungen sind dann ausgeschlossen, wenn ein ausreichend bemessenes Deckwerksgewicht ein weiteres Auftreten von örtlichen Bruchspannungsüberschreitungen verhindert. Im bodenmechanischen

Sinn kann nach dem Erreichen eines solchen Gleichgewichtszustandes dann die mit Bodeneintrag aufgefüllte Zusatzschicht als eine dünne Bodenschicht betrachtet werden, in der neben der Reibungsfestigkeit auch noch eine Kohäsion wirksam ist. Diese Kohäsionskraft kann bei der Standsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden, sofern die Dauerhaftigkeit des Materials gegeben ist.

Voraussetzung für das Einfließen von Bodenmaterial in die Zusatzschicht ist, daß die wirksame Porengröße der Zusatzschicht zum maßgebenden Korndurchmesser des einfließenden Bodenmaterials im richtigen Verhältnis aufeinander abgestimmt ist, d.h. ausreichend groß bemessen ist. Beim Vorliegen von kohäsiven Böden wird ein solcher Einwanderungsprozeß von Bodenpartikeln in das Porengefüge der Zusatzschicht eine wesentlich länger einwirkende Belastungszeit erfordern, bis der oben beschriebene Gleichgewichtszustand erreicht sein wird.

In welchem Grade diese Zusatzschicht tatsächlich mit Bodenpartikeln gefüllt sein kann, hängt also zweifellos von der gewählten Struktur dieser Schicht ab. Da gerade an der Grenzfläche zwischen anstehendem Boden und Filterschicht die größten örtlichen Druckgradienten auftreten, wie die hierzu durchgeführten Versuche zur schnellen Spiegelabsenkung gezeigt haben (vergl. Bild 2), ist eine erhöhte Scherfestigkeit innerhalb dieser Übergangsschicht besonders wichtig.

Mit dieser Betrachtungsweise lassen sich sicherlich die in der Praxis festgestellten positiven Aspekte der Anwendung von geotextilen Filtern mit Zusatzschichten einleuchtend erklären, sofern die oben beschriebenen Bedingungen erfüllt wurden. Die positiven Erfahrungen sind deshalb nicht allgemein übertragbar, weil unterschiedliche Wirkungsverhältnisse zwischen Boden- und Filterschicht in starkem Maße von den Inhomogenitäten und Kornabstufungen im Boden sowie insbesondere auch durch Bodenschichtungen beeinflusst werden.

6. Gleichgewichtsbetrachtung an einem Bodenelement

Bild 1 zeigt ein Bodenelement im Bereich einer Hangquelle und eines im Bereich unterhalb des Außenwasserspiegels. Die an den beiden Bodenelementen angreifenden Lasten sind durch die effektive Eigenlast  $W'$  und die Strömungskraft  $S$  gegeben:

$$W' = A \cdot (z \cdot \gamma' + D \cdot \gamma'_D) \tag{5}$$

$$S = i \cdot \gamma'_W \cdot A \cdot z \tag{6}$$

Für das im Bereich der Hangquelle liegende Bodenelement ist der Gradient  $i$  durch  $\sin\beta$  gegeben, im Bereich des Bodenelementes unterhalb des abgesenkten Außenwasserspiegels ist das Gefälle  $i$  durch den mittleren Wert des örtlichen Gefälles nach Gleichung (3a) bzw. (4a) gegeben. Für die erdstatische Betrachtung wird ein rechnerisches Grenzgleichgewicht zugrunde gelegt und es werden die Scherparameter in einer böschungsp parallelen Gleitfuge gesucht, unter denen dieses rechnerische Grenzgleichgewicht gerade erfüllt ist. Bei dieser Gleichgewichtsbetrachtung wird die entlang des Geotextils mobilisierte Reibungskraft  $T_g$  berücksichtigt. Sie hat die Größe:

$$T_g = A \cdot D \cdot \gamma'_D \cdot \cos\beta \cdot \tan \varphi'_g \tag{7}$$

Hierbei stellt  $\varphi'_g$  den drainierten Reibungswinkel zwischen Boden und Geotextil dar. Alle übrigen Größen gehen aus Bild 1 hervor. Die aus der Eigenlast der Bodenelemente resultierende Schubbeanspruchung  $T$  ist:

$$T = W' \cdot \sin\beta \tag{8}$$

Die für das Grenzgleichgewicht erforderliche widerstehende Scherkraft  $\text{erf } T$  wird mit Hilfe der Felleniusregel auf die vorhandenen Scherparameter bezogen:

$$\text{erf } T = W' \cdot \cos\beta \frac{\tan \varphi'}{FS} + \frac{A \cdot c'}{FS} \tag{9}$$

Hierbei stellt  $\varphi'$  den drainierten Reibungswinkel,  $c'$  die drainierte Kohäsion dar.  $FS$  ist die Sicherheit entsprechend der Felleniusregel, welche die vorhandene Scherfestigkeit zur erforderlichen Scherfestigkeit ins Verhältnis setzt.

Für die Gleichgewichtsbetrachtung werden zwei Volumenelemente der Dicke  $l$  senkrecht zur betrachteten Ebene herangezogen, die auf einer böschungsp parallelen Gleitfläche in der Tiefe  $z$  abrutschen.

Für das im Bereich der Hangquelle liegende Bodenelement ergibt sich die folgende Gleichgewichtsbedingung:

$$T + S = \text{erf } T + T_g \tag{10}$$

Da der gedachte Grenzgleichgewichtszustand unterhalb des tatsächlichen Grenzgleichgewichtszustandes liegen soll, wird auch für die Mobilisierung der Reibungskraft am Geotextil eine Sicherheit eingeführt, so daß Gleichungen (5), (6), (7), (dividiert durch  $FS$ ), (8) und (9) in (10) eingesetzt, liefert:

$$A(z \gamma' + D \gamma'_D + \gamma'_W z) \sin\beta = \frac{A}{FS} (D \gamma'_D \cos\beta \tan \varphi'_g + \dots \dots (z \gamma' + D \gamma'_D) \cos\beta \tan \varphi' + c') \tag{11}$$

Aufgelöst nach  $FS$  erhält man folgenden Ausdruck:

$$FS = \frac{(z \gamma' + D \gamma'_D) \cos\beta \tan \varphi' + D \gamma'_D \cos\beta \tan \varphi'_g + c'}{(z \gamma' + D \gamma'_D + \gamma'_W z) \sin\beta} \tag{12}$$

Für das Bodenelement unterhalb des abgesenkten Außenwasserspiegels muß berücksichtigt werden, daß die nach außen gerichtete Strömungskraft die Normalkraft in der böschungsp parallelen Gleitfläche reduziert. Damit muß die Gleichung (9) wie folgt modifiziert werden:

$$W' \sin\beta = \text{erf } T + \text{erf } T_g \tag{13}$$

Die Grenzgleichgewichtsbedingung lautet für diesen Fall:

$$\text{erf } T = (W' \cos\beta - S) \frac{\tan \varphi'}{FS} + \frac{A \cdot c'}{FS} \tag{14}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (5), (6), (7) und (13) in (14) erhält man die Sicherheit  $FS$ , Gleichung (15):

$$FS = \frac{((z \gamma' + D \gamma'_D) \cos\beta - i \gamma'_W z) \tan \varphi' + D \gamma'_D \cos\beta \tan \varphi'_g + c'}{(z \gamma' + D \gamma'_D) \sin\beta} \tag{15}$$

Durch eine entsprechende Wahl der Dicke und der Wichte des Deckwerkes, also der Größen  $D$  und  $\gamma'_D$ , muß sichergestellt werden, daß für jede beliebige Tiefe  $z$  eine ausreichende Sicherheit nach den Gleichungen (12) und/oder (15) gewährleistet ist. Die erforderliche Sicherheit kann dabei entsprechend DIN 4084 festgelegt werden.

7. Beispiel für die praktische Anwendung

Die Anwendung der vorliegenden Formeln wird an der Bemessung der Dicke D eines Deckwerkes auf dem schwach ungleichförmigen Mittelsand ( $C_u = 5,9$ ), (vergl. Bild 2), für den unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels liegenden Böschungsbereich dargestellt. Die folgenden Kenngrößen beschreiben die Geometrie der Böschung und die Eigenschaften des Untergrundes:

Böschungsneigung:  $1:n = 1:3$  ( $\beta = 18,43^\circ$ )  
 Absink:  $z_A = 85 \text{ cm}$   
 Untergrund:  $\gamma_A = 10 \text{ KN/m}^3$   
 $\phi' = 30^\circ$   
 $\psi_g = 30^\circ$   
 Geotextil:

Als Deckwerk ist eine lose Steinschüttung mit einer Dicke von  $D = 30 \text{ cm}$  vorgesehen mit einem Auftriebsraumgewicht  $\gamma_D' = 12 \text{ KN/m}^3$ . Das mittlere hydraulische Gefälle  $i_m$  wird nach Gleichung (4a) ermittelt. Nach Gleichung (15) ergibt sich die Sicherheit FS eines böschungsparellen Bodenelementes in der Tiefe z, z.B. für  $z = 0,1 \text{ m}$ :

mit  $i_m = 3,77$  folgt  $FS = 1,59$

und für  $z = 0,3 \text{ m}$ :

mit  $i_m = 2,46$  folgt  $FS = 0,63$

Das Ergebnis zeigt, daß ein  $30 \text{ cm}$  dickes Deckwerk mit einer Wichte von  $\gamma_D' = 12 \text{ KN/m}^3$  nicht ausreicht, den Bruchzustand im vorliegenden Boden zu verhindern. Beim weiteren Fortgang der Berechnung ist durch Variation von z und D das Minimum der Sicherheit so zu suchen, daß  $FS = \text{erf } FS$  wird, wobei erf FS nach bodenmechanischen Kriterien festgelegt werden kann. Im vorliegenden Beispiel ergab sich die kleinste Sicherheit zu  $FS = 0,62$  für eine Tiefe von  $z = 0,33 \text{ m}$ . Ausreichende Sicherheit ergibt sich erst für eine Deckwerksdicke von  $D = 0,60 \text{ m}$ .

Praktische Lösungen ergeben sich auch durch unmittelbare Vergleichsrechnungen mit den Gleichungen (15) und (4a), wenn man sie nach den volumenbezogenen Kraftgrößen  $i \cdot \gamma_w$  (Strömungsdruck j) auflöst. Die grafische Auftragung im Bild 5 verdeutlicht in allgemeiner Form, wo die rutschgefährdeten Boden zonen unterhalb des Deckwerkes liegen.

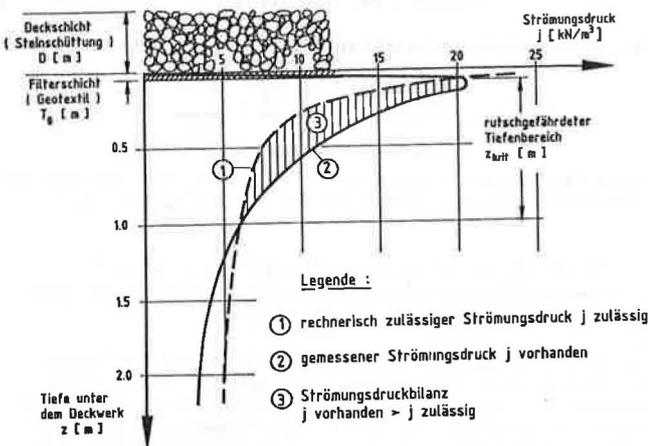


Bild 5 : Strömungsdruck j unter einem Deckwerk bei plötzlichem Wasserspiegelsink

8. Zusammenfassung

Da ungeschützte Ufer von Wasserstraßen in den gewünschten Böschungsneigungen nicht ohne Schutz standsicher sind, werden Ufer seit Jahrzehnten mit Hilfe von Deckwerken stabilisiert. Mit der Einführung von Geotextilien haben sich neuartige Deckwerksbauweisen entwickelt, die im Unterschied zu den klassischen Verfahren der auf Kornfilterschichten gebetteten losen Steinschüttung in immer stärker anwachsendem Maße zu den auf geotextilen Filtern aufgelegten Verbundbauweisen führte. Die Anwendung des Geotextils brachte jedoch auch Probleme mit sich, die in der leichten, sprich dünneren Deckschichtbauweise begründet waren. Darüberhinaus war das Problem der ausreichenden Filterwirksamkeit von Geotextilien zu beachten. Neben dieser Filterfunktion kann es aber auch eine statische Funktion erfüllen, wenn es vollflächig und eben auf der Böschung aufliegt und oberhalb der Wasserwechselzone ausreichend verankert ist. Die Sicherheit eines solchen Deckwerkes wurde für den Bereich der bei schneller Spiegelabsenkung entstehenden Hangquelle und des im Bereich unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels auftretenden Druckgradienten abgeleitet. Dabei wurden vereinfachende, für die Dimensionierung von Deckwerken jedoch überaus wichtige Annahmen über den Druckabbau des Porenwassers in der Böschung infolge der schnellen Spiegelabsenkung getroffen. Aus dem Vergleich mit ausgeführten Beispielen konnte gezeigt werden, daß das Bemessungskonzept zutreffende Beurteilungen der Standsicherheit von Deckwerken gestattet. Die tatsächlichen Verhältnisse führen zu dreidimensionalen Porenwasserdruckverteilungen im Untergrund, die rechnerisch nicht einfach zu ermitteln sind. Das Problem des Aufschlagens von Wellen auf das Deckwerk ist in diesem Bemessungskonzept noch nicht berücksichtigt. Im Prinzip kann dieser daraus resultierende Ansatz der Druckverteilung im Untergrund jedoch in ähnlicher Weise in die Berechnung eingeführt werden. Für solche Beanspruchung liegen jedoch noch keine ausreichenden Grundlagen über die Porenwasserdruckverteilung im Böschungsuntergrund vor.

9. Literatur

- (1) Köhler, H.-J., "Verklammerung von Schüttsteindeckwerken, Anwendung von Kornfiltern und allgemeine Betrachtungen zur Standsicherheit von Deckwerken", BAW-Vortrag am 01.07.1980 in der Vortragsveranstaltung der WSD Süd in Würzburg
- (2) Barends, F.B.J., "The compressibility of an air-water mixture in a porous medium", Igm medelingen, Delft Soil Mechanics Laboratory, The Netherlands, 1979
- (3) deGroot, M.T., Sellmeijer, J.B., "Wave-induced pore water pressures in a two-layer system", Igm medelingen, Delft Soil Mechanics Laboratory, The Netherlands, 1979
- (4) Köhler, H.-J., "Untersuchung von instationären Wasserdrücken in porösen Medien", Forschungsbericht, BAW Karlsruhe, 1983
- (5) Schneider, A., "Untersuchung von instationären Wasserdrücken in porösen Medien", Diplomarbeit, BAW und FH Karlsruhe, 1985
- (6) Schulz, H., "Anwendung von Geotextilien auf Böschungen", 1. Nationales Symposium Geotextilien im Erd- und Grundbau, Mainz, 1984
- (7) Schnitter, G., Zeller, J., "Sickerströmungen als Folge von Stauspiegelschwankungen", Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETH Zürich, Heft 50, 1957