

Geotechnische Aspekte von Kolkentwicklung und Kolkschutz

Geotechnical Parameters of Scouring and Scour Countermeasures

DR.-ING. MICHAEL H. HEIBAUM, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (FEDERAL WATERWAYS ENGINEERING AND RESEARCH INSTITUTE)

1 Introduction

Scour is a problem of the interaction at the boundary of water and soil. In most cases it is considered a hydraulic problem only. This means that the interaction is looked at from the water side. So nearly all approaches to calculate scour effects represent the hydraulic point of view. But one has also to consider the soil or rock that is influenced by the hydraulic load including the interaction of the surface water and the pore water.

In many analytical approaches of scour development, the influences of the subsoil material (grain diameter, unit weight, density, shear strength, etc.) are very roughly expressed in terms of the medium diameter d_{50} only. Sometimes the geometric standard deviation d_{84}/d_{50} or something similar is taken into account.

As an example, Lauchlan (2000) and Lauchlan & Melville (2001) give a wide overview of the analytical approaches of rip rap size prediction for scour countermeasures. It is not astonishing that the scatter of results when designing rip rap size is very large: for a given Froude number the rip rap size varies by a factor of 10. The subsoil in all these calculations is represented only by a mean grain diameter (e.g. d_{50}) and the specific gravity of the grain. The pore water is not taken into consideration at all in any approach, nor is the layer thickness of the top bed layer (or the armour layer).

Therefore in the following, some effects of the interaction of surface water, pore water and soil are discussed by trying to improve understanding of the scouring process and looking a bit more closely at the material that is eroded.

1 Einführung

Kolke entstehen auf Grund von Wechselwirkungen an der Grenze von Wasser und Boden. Meist wird dies als rein hydraulisches Problem betrachtet, d. h., dass die Kolkbildung nur von der Wasserseite aus betrachtet wird. Aus diesem Grund enthalten alle Ansätze zur Berechnung der Kolkentwicklung fast nur hydraulische Parameter. Jedoch sollte auch der Boden oder der Fels, der hydraulisch belastet wird, genauer betrachtet werden, ebenso die Wechselwirkung von freiem Wasser und Porenwasser.

In vielen Ansätzen zur Kolkentwicklung werden die Bodeneigenschaften (Korndurchmesser, Wichte, Lagerungsdichte, Scherfestigkeit usw.) nur sehr grob erfasst, meist nur durch den mittleren Korndurchmesser d_{50} . Manchmal werden zusätzlich die Ungleichförmigkeit oder die „geometrische Standardabweichung“ d_{84}/d_{50} oder ähnliche Parameter berücksichtigt, mehr jedoch nicht.

Als Beispiel dafür seien Lauchlan (2000) und Lauchlan & Melville (2001) genannt, die einen breiten Überblick über die analytischen Berechnungsverfahren zur Bestimmung der erforderlichen Steingröße für Kolksicherungen geben. Es überrascht nicht, dass die resultierende Streubreite der Ergebnisse bei der Bemessung der Steingröße sehr groß ist: Für eine bestimmte Froude-Zahl streut der ermittelte Steindurchmesser um den Faktor 10. Der Untergrund ist bei all diesen Berechnungen nur durch den mittleren Korndurchmesser und die Kornwichte beschrieben. Das Porenwasser, bzw. der Porenwasserdruck, wird bei allen Ansätzen überhaupt nicht berücksichtigt, auch nicht andere wesentliche Einflussfaktoren, wie die Schichtdicke der Deckschicht.

Deshalb werden im Folgenden einige Auswirkungen der Wechselwirkung von freiem Wasser, Porenwasser und Boden diskutiert. Es wird versucht, den Vorgang des Kolkens zu verstehen und das Material, das erodiert wird, etwas näher zu betrachten.

2 Empirical geotechnical approach

One of the few mainly geotechnical approaches is given by Annandale (1995). To determine the susceptibility against erosion, the rate of energy dissipation per unit width of flow and the erodability index are compared. For both granular material and rock and other complex earth material there is a linear relationship of erodability index and energy dissipation in the log-log-scale.

This approach is empirical, but it gives a first estimate under which load scour may originate. On this basis there is also given an approach to calculate the scour depth (Smith, 1994) which is still under discussion.

A promising approach for fine grained soil is presented by Briaud et al. (2000, 2001). In a special testing equipment the erosion rate is determined. With an empirical calculation procedure it is possible to calculate the initiation of scour and the expected scour depth. This approach is important, since it was found by the authors that any correlation of the erosion rate and standard soil parameters is very poor, so the experimental procedure seems to be the only reliable one.

3 Taking into account pore water pressure

3.1 Stress and resistance

Most tests to cover erosion processes are performed using a steady flow of a certain velocity resulting in a certain shear stress. It is a matter of common use and general consensus to consider the shear stress as the major load parameter. But not only stress should be considered but resistance as well.

Concerning soil, resistance is given by the intergranular strength which is expressed in terms of internal angle of friction and cohesion. While cohesion is more or less independent of the intergranular stresses (however, stress history may have a large influence on the magnitude of cohesion), the shear strength caused by friction is linearly dependent on normal (effective) stress. Effective stress is directly dependent on pore water pressure. Knowing this, it is easy to understand that the pore water pressure has an important influence – in cohesionless soils even more than in cohesive soils.

2 Empirische geotechnische Bemessungsverfahren

Einige der wenigen geotechnischen Ansätze für die Kolkentwicklung stammen von Annandale (1995). Um die Erosionsneigung zu bestimmen, werden ein „Erosionsindex“ und der Grad der Energie-Dissipation per Einheitsbreite verglichen. Sowohl für Lockergestein als auch für Fels wurde im doppelt logarithmischen Maßstab eine lineare Beziehung von Erosionsindex und Energie-Dissipation gefunden.

Dieser Ansatz ist rein empirisch, ermöglicht aber eine erste Abschätzung, bei welcher hydraulischen Belastung ein Kolk entstehen kann. Auf dieser Basis wird auch eine Abschätzung der zu erwartenden Kolkentiefe formuliert (Smith, 1994), über die aber noch gestritten wird.

Von Briaud et al (2000, 2001) wird ein vielversprechender Ansatz für bindige Böden vorgestellt. In einer besonderen Versuchsanordnung wird die Erosionsrate bestimmt. Mit einer empirischen Bemessungsformel ist es möglich, den Beginn des Kolkens und die erwartete Kolkentiefe zu ermitteln. Dieser Ansatz ist insofern wichtig, weil die Autoren gezeigt haben, dass alle Korrelationen von Erosionsrate und allgemein üblichen Bodenparametern sehr schlecht sind, sodass ein Zusammenhang ausschließlich mit Versuchen erhalten werden kann.

3 Berücksichtigung des Porenwasserdruckes

3.1 Einwirkung und Widerstand

Die meisten Versuche zum Erosionsverhalten werden mit einer konstanten Strömung mit einer definierten Geschwindigkeit durchgeführt, die zu einer bestimmten Scherbeanspruchung führt. Es herrscht allgemeine Übereinstimmung, dass die Scherbeanspruchung der wichtigste Lastparameter ist. Allerdings sollte nicht nur die Belastung, sondern auch der Widerstand berücksichtigt werden.

Was den Boden betrifft, ergibt sich der Widerstand aus der inneren Festigkeit des Bodens, die im Allgemeinen durch den inneren Reibungswinkel und die Kohäsion ausgedrückt wird. Während die Kohäsion mehr oder weniger unabhängig vom Spannungszustand im Boden ist (allerdings hat die Spannungsgeschichte einen sehr großen Einfluss auf die Größe der Kohäsion), ist die Scherfestigkeit infolge Reibung nahezu linear abhängig von der effektiven Normalspannung. Die effektive Normalspannung ist wiederum direkt abhängig vom Porenwasserdruck. Aus diesem Grunde ist es leicht verständlich, dass der Porenwasserdruck einen großen Einfluss hat - in kohäsionslosen Böden deutlich mehr als in kohäsiven Böden.

3.2 Time dependency of the pore water pressure

Hydrostatic pore water pressure is defined by the hydraulic head. The pore water pressure in a steady flow is usually quasi hydrostatic. But flowing water may generate an unsteady pore water pressure due to turbulence, vortices, large or small eddies. Unsteady pore water pressure will also be created by regular or irregular changes of the hydraulic head, e.g. sudden increase or drop of the water level or waves. Effects are enlarged when they are superimposed.

Measurements revealed that pore water pressure may not only be unsteady but may also show a certain time delay. This means that the pore water pressure at a certain point does not change simultaneously with the hydraulic head above that point.

To access scour, the delayed reaction of pore water pressure is a very important issue, since it may result in an unsteady excess pore water pressure in the subsoil, thus destabilising the soil skeleton.

As early as 1981, Nago and Maeno discussed the effect of oscillating water pressure on the surface on the pore water regime in a sand layer and concluded that this effect may influence the design of hydraulic structures and may create engineering problems like scouring. They observed a damping of the pressure variation with depth z and a lag in phase, when natural water was used (natural water always contains some air!). Figure 1 shows this effect which is diminished when de-aired water is used. It would vanish when an ideal (= incompressible) fluid is used.

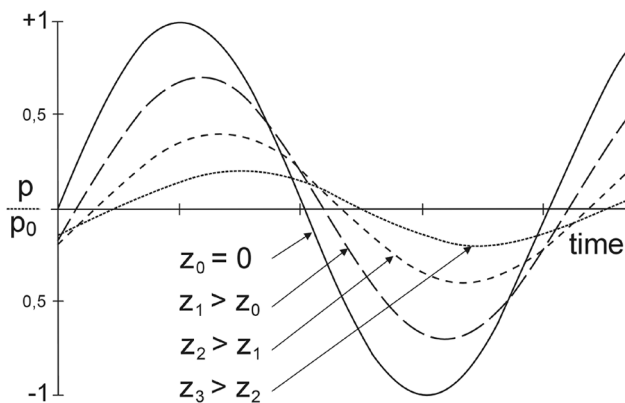


Figure 1: Variation in pore pressure with time

Bild 1: Änderungen im Porenwasserdruck mit Zeitangabe

Detailed calculation and experimental verification was published by the same authors in 1984. It was proved that under certain conditions the effective stress becomes zero. Liquefaction will occur and the sand will be scoured by the flow tangential to the soil surface. In a recent paper of Mia and Nago (2000) it was stated

3.2 Zeitabhängigkeit des Porenwasserdruckes

Der hydrostatische Porenwasserdruck ist durch den Ruhewasserspiegel gegeben. Der Porenwasserdruck unter einer konstanten Strömung ist meist quasi-hydrostatisch. Fließendes Wasser kann allerdings einen instationären Porenwasserdruck hervorrufen infolge von Turbulenzen oder Wirbeln. Instationäre Porenwasserdrücke werden ebenfalls hervorgerufen durch regelmäßige oder unregelmäßige Änderungen der Wasserspiegellage, z. B. durch einen plötzlichen Wasserspiegelanstieg oder -absenk oder durch Wellen. Die einzelnen Auswirkungen können sich überlagern.

Messungen haben gezeigt (Köhler 1989), dass der Porenwasserdruck nicht nur instationär sein kann, sondern auch gegenüber dem äußeren Wasserdruck eine gewisse Zeitverzögerung aufweist. Das bedeutet, dass der Porenwasserdruck in einem bestimmten Punkt sich nicht zeitgleich mit dem Wasserspiegel über diesem Punkt ändert.

Um die Kolkbildung besser zu verstehen, ist die verzögerte Porenwasserdruckreaktion ein wichtiger Aspekt, da sie zu instationären Porenwasserüberdrücken im Boden führt und damit das Korngerüst destabilisiert.

Bereits 1981 haben Nago und Maeno den Einfluss eines wechselnden Wasserdruckes auf der Bodenoberfläche auf die Porenwasserdruckverteilung in einem Sanduntergrund näher untersucht und festgestellt, dass diese Auswirkungen die Bemessung von Wasserbauwerken beeinflussen und zu Problemen wie Kolkbildung führen können. Sie beobachteten eine Dämpfung der Druckänderungen und Phasenverschiebungen mit der Tiefe, wenn natürliches Wasser in den Versuchen verwendet wurde (natürliches Wasser enthält immer einen gewissen Luftanteil!). Bild 1 zeigt diesen Effekt der sich verringert, wenn entlüftetes Wasser benutzt wird. Er würde ganz verschwinden, wenn eine ideale (d. h. inkompressible) Flüssigkeit verwendet würde.

Detaillierte Berechnungen und Nachweise durch Versuche wurden von denselben Autoren 1984 veröffentlicht. Es wurde gezeigt, dass unter bestimmten Randbedingungen die effektiven Spannungen zu Null werden. Es tritt eine Bodenverflüssigung ein und der Sand wird durch eine Strömung tangential zur Bodenoberfläche erodiert. In einer jüngeren Veröffentlichung von Mia und Nago (2000) wurde ausgesagt, dass „das Maximum der Kolkbildung in einem Zustand auftrat, bei dem die effektive Spannung deutlich reduziert war infolge der Belastung durch eine plötzliche Wasserdruckänderung“. Yu, Maeno und Nago (2001) beschreiben einen numerischen Ansatz für den Verflüssigungsvorgang der obersten Bodenschicht unter wechselnder Wasserdruckbelastung. Es ist leicht zu verstehen, dass ein verflüssigter Boden schon bei geringer Strömung verlagert werden kann.

that "the excess scour depth always found a maximum at a stage of considerably reduced effective stress under the application of abrupt water pressure change". Yu, Maeno & Nago (2001) present a numerical approach to the liquefaction process of the top soil layer loaded by oscillating pressures. It is easy to understand that a liquefied soil will be eroded immediately by even a mild current.

To take into account the transient pore water pressure and the time dependent local flow conditions in the subsoil, Köhler developed a design model in 1979. The distribution of the excess pore water pressure with depth is described by an exponential function with only one parameter. This pore pressure parameter "b" is dependent on the soil permeability, the compressibility of the soil and the compressibility of the pore water (Schulz & Köhler 1986). For many practical calculations a design chart has been developed (Bezuijen & Köhler 1996) dependent on soil permeability and time of pressure drop.

3.3 Measurement of the pore water pressure

Based on the idea that bank damage is caused not only by currents and waves but also by changes in the pore water regime, measurements were undertaken to gain more information on the interaction of pore water and surface water. Pore water pressure gauges were installed at several depths in the soil and on the surface. It is nearly impossible to install numerous pore water pressure transducers in an existing slope geometry without disturbing the flow pattern and with only minimal damage to the soil. A solution was found by driving steel tubes (diameter 60 mm) into the soil with filter protected openings near the tip. The gauges are put into place only for the measurement, thus avoiding damage to the sensitive instruments. The gauges are isolated in the tube by a special mechanical packer system. This system allows for long-term measurements in many applications (Köhler & Feddersen 1991).

3.4 Verification in laboratory tests

Also in a triaxial apparatus the effect of delayed pore water reaction can be shown rather easily. If the water pressure on one side of the sample is changed suddenly, on the other side it will be measured only after a delay. The pore water pressure inside the sample adapts nonlinearly in time and place (Figure 2). The speed of the change is dependent on the air content and thus on the compressibility of the pore fluid. This test is often used to verify the complete saturation of a cohesive sample in a triaxial test. A pressure change at one end of the sample will be noticed at the other end, the faster the less air or gas remains in the sample. When all air or gas in the pore water is dissolved by back pressure,

Köhler entwickelte 1979 einen rechnerischen Ansatz, um den veränderlichen Porenwasserdruck und die zeitabhängigen lokalen Strömungsbedingungen im Untergrund zu berücksichtigen. Die Verteilung des Porenwasserüberdruckes über die Tiefe wird über eine Exponential-Funktion mit nur einem Parameter abgebildet. Dieser Porenwasserdruckparameter „b“ ist abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens, der Zusammendrückbarkeit des Bodens und der Zusammendrückbarkeit des Porenwassers (Schulz und Köhler, 1986). Für viele praktische Anwendungen wurde ein Bemessungsdiagramm entwickelt (Bezuijen und Köhler, 1996) mit den Parametern Durchlässigkeit und Geschwindigkeit des Druckabfalls.

3.3 Messung des Porenwasserdrucks

Auf Grundlage der Überlegung, dass ein Böschungsbruch nicht nur durch Strömung und Wellen verursacht wird, sondern auch durch Änderungen im Porenwasserregime, wurden Messungen durchgeführt, um mehr Informationen über die Wechselwirkung von Porenwasser und freiem Wasser zu erhalten. Dafür wurden Porenwasserdruckmesselemente in verschiedenen Tiefen im Boden und auf der Oberfläche installiert. Es ist fast unmöglich, Messelemente zur Porenwasserdruckmessung in einem bestehenden Uferuntergrund einzubringen ohne das Grundwasserströmungsverhalten zu ändern und mit nur einer minimalen Störung des Bodens. Die Lösung war das Einrammen von Stahlrohren mit 60 mm Durchmesser mit geschützten Filteröffnungen an der Spitze. Die Messelemente wurden nur für die Messung

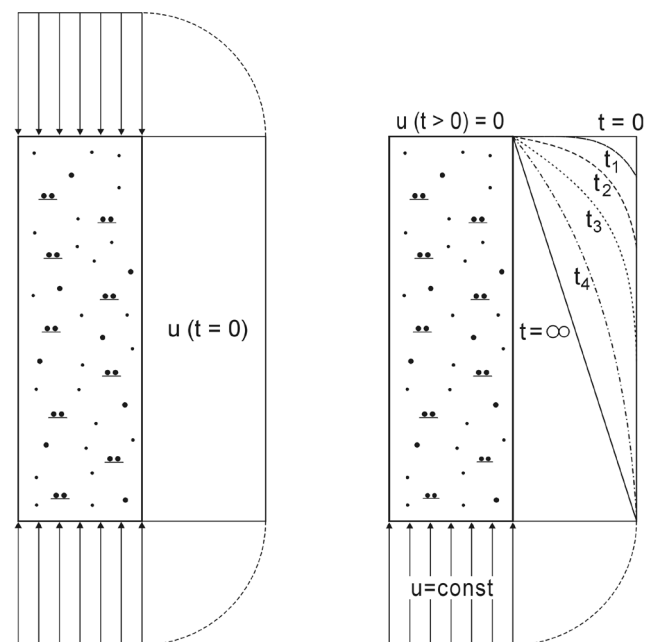


Figure 2: Time dependent pore water pressure distribution after sudden change at one end of the specimen

Bild 2: Zeitabhängige Porenwasserdruckverteilung nach plötzlicher Veränderung an einem Ende des Musters

then the pressure change in the whole sample will take place at the same time, or more correctly: will proceed at the speed of sound in the fluid considered.

3.5 Explanation by a simple model

Delayed pore water reduction after a sudden drop of the outside water pressure is not only due to a low permeability, as it is often presumed. The major reason is the air content of the pore water, as has been demonstrated in the triaxial test apparatus. So a three phase system, i.e. soil, water and gas, has to be considered instead of a two phase system with the soil and an ideal pore fluid alone. Pore water in nature as well as the surface water are not ideal (incompressible) fluids. Small microscopic air (gas) bubbles are dispersed in the water. Therefore the fluid shows a certain compressibility, which is proportional to the amount of gas content in the pore water. Compressible pore water causes the delayed reaction of the pore water pressure on any change in water pressure at the boundaries.

This phenomenon has been discussed earlier considering offshore foundations (Nago & Maeno 1987). It was found that the pore water pressure reaction on the varying water pressure of the waves was delayed and that at a certain depth no change of the pore water pressure took place at all, since the changes of the surface water pressure were too fast to cause any reaction at that depth. So during certain time steps excess water pressures developed below the foundation.

The phenomenon may be explained by a very simple model. The pore channels may be considered as thin pipes filled with an incompressible fluid with some air bubbles in-between (Figure 3). If there is a pressure drop on one side of the pipe, the new pressure will proceed in the fluid to the first bubble. To adopt the new pressure,

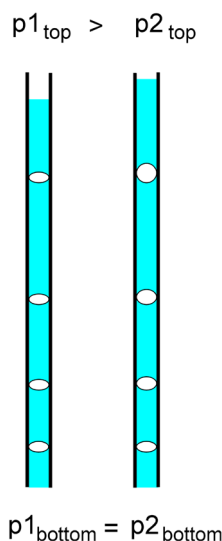


Figure 3: Expansion of bubbles due to pressure drop

Bild 3: Ausdehnung von Blasen nach Druckabfall

selbst in die Röhren eingeführt, wodurch ein Beschädigen der Messelemente weitgehend vermieden werden konnte. Die Messelemente wurden mit einem besonderen Packer gegenüber dem äußeren Luftdruck abgesperrt. Dieses Konzept erlaubte auch Langzeitmessungen in zahlreichen Anwendungsfällen (Köhler und Feddersen, 1991).

3.4 Überprüfung in Laborversuchen

In einem Triaxialgerät kann die verzögerte Porenwasserdruckreaktion relativ leicht nachvollzogen werden. Wird der Wasserdruck an einem Ende der Probe plötzlich geändert, so wird diese Änderung am anderen Ende nur nach einer bestimmten Zeitverzögerung gemessen werden. Der Porenwasserdruck in der Pore gleicht sich nicht linear in Zeit und Ort an (Bild 2). Die Geschwindigkeit des Angleichens ist abhängig vom Luftgehalt und damit von der Zusammendrückbarkeit der Porenflüssigkeit. Diese Prüfung wird häufig benutzt, um die vollständige Sättigung einer bindigen Bodenprobe im Triaxialversuch festzustellen. Die Druckänderung an einem Ende der Probe wird am anderen Ende um so schneller erfolgen, je weniger Luft oder Gas in der Probe enthalten ist. Wenn alle Luft im Porenwasser durch entsprechenden „backpressure“ gelöst ist, wird die Druckänderung in der gesamten Probe gleichzeitig erfolgen oder genauer: wird sich mit Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit fortpflanzen.

3.5 Vereinfachte Modellvorstellung

Der verzögerte Porenwasserdruckabfall nach einem plötzlichen Druckabfall im freien Wasser ist nicht nur Folge einer geringen Durchlässigkeit, wie es oft vermutet wird. Der Hauptgrund ist der Luftgehalt des Porenwassers, wie es oben für den Dreiaxialversuch gezeigt wurde. Daher muss ein Dreiphasensystem betrachtet werden, d. h. Boden, Wasser und Luft, anstelle des üblichen Zweiphasensystems, bei dem Boden und eine ideale Flüssigkeit angenommen werden. Porenwasser und freies Wasser in der Natur sind keine idealen (inkompressiblen) Flüssigkeiten. Mikroskopisch kleine Luftblasen sind im Wasser verteilt. Daher ist die Flüssigkeit in einem gewissen Maß zusammendrückbar, und zwar proportional zu dem Luftgehalt im Porenwasser. Dieses zusammendrückbare Porenwasser führt zu verzögerten Reaktionen des Porenwasserdruckes auf einer Wasserdruckänderung an der Bodenoberfläche.

Im Zusammenhang mit Offshore-Gründungen wurde dieses Phänomen schon früher betrachtet (Nago und Maeno, 1987). Es zeigte sich, dass die Porenwasserdruckreaktion auf die Wasserspiegeländerungen infolge von Wellen verzögert erfolgte und dass in einer bestimmten Tiefe gar keine Änderung des Porenwasserdruckes festzustellen war, denn die Änderung des Wasserdruckes auf der Bodenoberfläche war zu schnell, um

the air bubble tries to expand. The expansion of the bubble initiates a flow of the fluid. This flow takes time since the shear resistance at the interface of fluid and pipe and the inertia of the fluid have to be overcome. The pressure in the fluid on the other side of the bubble will change only as much as its volume and in this way the pressure in the bubble.

4 Failure modes in the subsoil

Due to the above mentioned effects failure may occur in the soil at the bottom of a river or canal or in the seabed, when a sudden draw down (a sudden drop of the hydraulic head) occurs. This will be explained by considering a horizontal soil surface below a water table. Figure 4 shows the distribution of total (σ_r), neutral (u) and effective (σ') stresses before (solid line) and after (dotted line, symbols underlined: $\underline{\sigma}_r$, $\underline{u}$, $\underline{\sigma}'$) a draw down. The total stresses are given by the specific weight of soil and water. This will decrease immediately with the draw down according to the amount of water withdrawn. Considering a certain time step, the pore water pressure (neutral stress) remains at a certain depth as before the draw down and decreases towards the surface non-linearly.

During that unsteady process, analytically from the surface to a certain depth, the neutral stresses are larger than the total stresses which cannot be true. This surplus of energy is dissipated by flow of the water. Only from that depth, effective stresses are greater than zero, so the soil above is in the limit state, and respectively in the state of suspension.

That state can also be shown by means of Mohr's circles: Figure 5 shows that due to the retarded decrease of pore water pressure, the circle of effective stresses is shifted the same amount as the circle of total stresses. Dependent on the initial state of stress, Mohr's limit state may be reached, the soil is "liquefied". From Figure 5 one can easily find the positive outcome of cohesion (the failure line is shifted upwards on the τ -axis) or of a surface load (the circle of stress is shifted to the right on the σ -axis). This was also shown by Zen (2000), where a liquefied zone developed in the sea bed at the toe of a rubble mound breakwater but not below it.

The result of that theoretical discussion is well known: A non-cohesive fine-grained soil without protection layer is liquefied, when a sudden drop of the water table occurs, respectively the hydraulic head above the soil. Liquefaction will result in a movement downward any slope and a flattening until a balance is reached, and in the case of any current, any liquefied material will be eroded at once.

entsprechende Reaktionen in der Tiefe hervorzurufen. Dadurch entwickeln sich in bestimmten Zeitabschnitten Porenwasserüberdrücke unter der Gründung.

Dieses Phänomen soll mit einem sehr einfachen Modell erklärt werden. Die Porenkanäle des Bodens sollen als dünne Röhren betrachtet werden, gefüllt mit einer inkompressiblen Flüssigkeit mit einigen Luftblasen dazwischen (Bild 3). Fällt der Druck auf einer Seite der Röhre plötzlich ab, so wird sich der neue Druck in der Flüssigkeit sofort bis zur ersten Blase fortpflanzen. Um den neuen Druck anzunehmen, muss die Blase sich ausdehnen. Diese Ausdehnung der Blase erzeugt ein Fließen der Flüssigkeit. Dieser Fließvorgang benötigt Zeit, denn die Reibungswiderstände an der Röhrenwandung und die Trägheitskräfte der Flüssigkeit müssen überwunden werden. Der Flüssigkeitsdruck auf der anderen Seite der Blase kann sich nur insoweit ändern, wie sich das Volumen der Gasblase verändert hat.

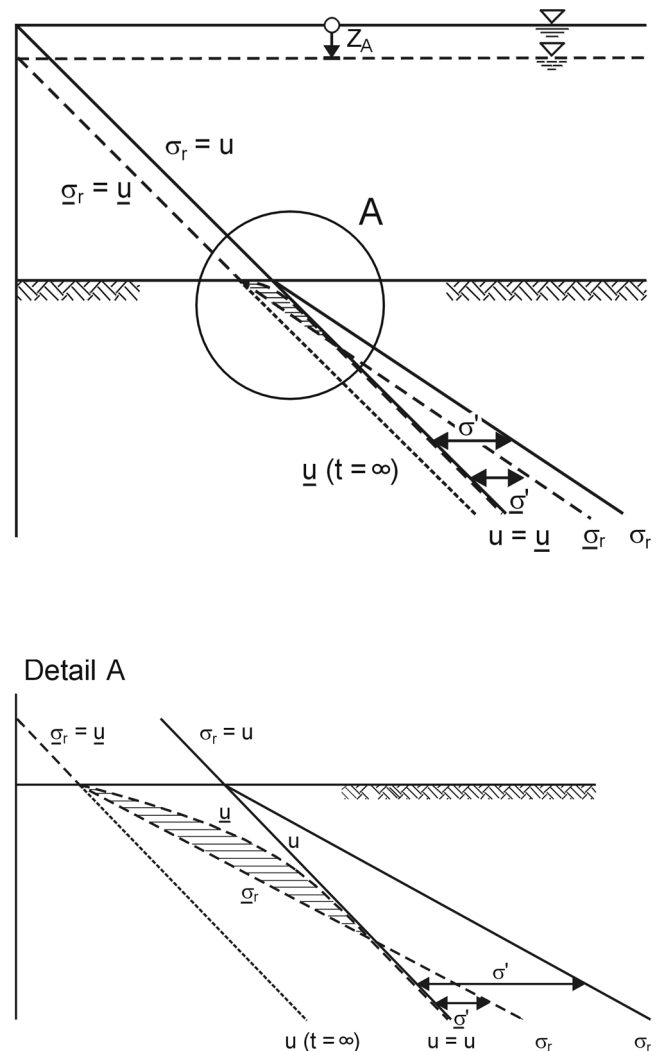


Figure 4: Stress distribution before ($\underline{\sigma}$, $\underline{u}$) and after (σ , u) a sudden drawdown

Bild 4: Spannungsverteilung vor ($\underline{\sigma}$, $\underline{u}$) und nach (σ , u) einem plötzlichen Spiegelabsenk

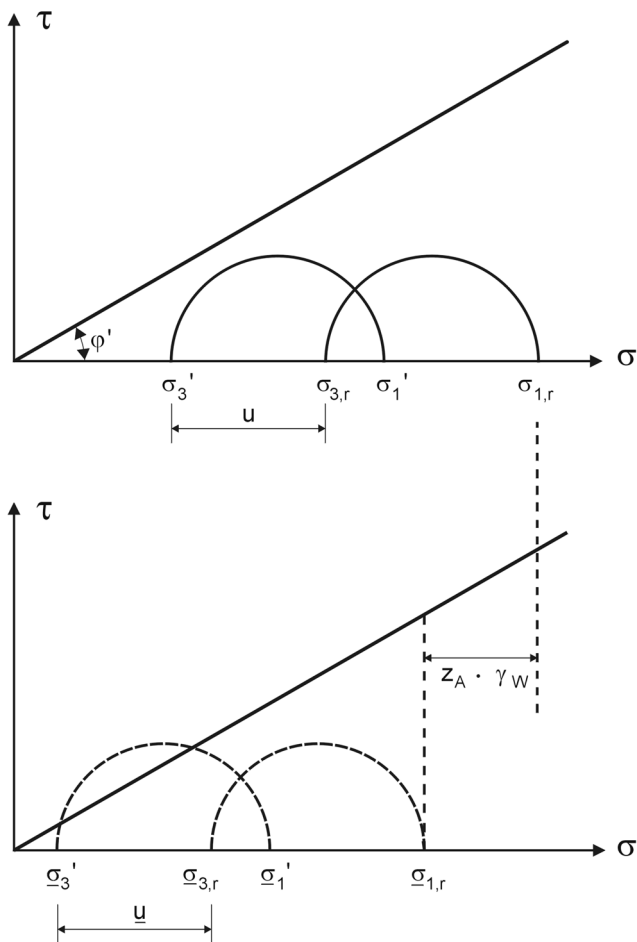


Figure 5: Mohr's circles for total (σ) and effective (σ') stresses before (σ) and after (σ') drawdown

Bild 5: Mohr'sche Spannungskreise für totale (σ) und effektive (σ') Spannungen vor (σ) und nach (σ') Spiegelabsenk

4 Bruchzustände im Boden

Infolge der beschriebenen Vorgänge kann im Boden eines Flussbettes oder des Meeresgrundes ein Bruchzustand eintreten, wenn eine plötzliche Spiegelsenkung (oder generell ein plötzlicher Druckabfall) auftritt. Dies soll am Beispiel einer horizontalen Bodenoberfläche in einer bestimmten Wassertiefe erklärt werden. Bild 4 zeigt die Verteilung der totalen (σ_r), neutralen (u) und effektiven (σ') Spannungen vor (durchgezogene Linie) und nach (strichliert, Symbole unterstrichen: $\underline{\sigma}_r$, $\underline{u}$, $\underline{\sigma}'$) einer schnellen Spiegelsenkung. Die totalen Spannungen sind durch das spezifische Gewicht von Boden und Wasser gegeben. Sie werden zeitgleich und größengleich mit einem Spiegelabsenk abfallen. Betrachtet man einen kurzen Zeitpunkt danach, wird der Porenwasserdruck (die neutralen Spannungen) in einer bestimmten Tiefe noch dieselbe Größe wie vor dem Spiegelabsenk aufweisen und zur Bodenoberfläche hin nicht linear abfallen.

Während dieses instationären Vorgangs können rein rechnerisch oberflächennah die Wasserdrücke größer als die totalen Spannungen werden, was physikalisch nicht möglich ist. Dieser rechnerische Energieüberschuss wird durch den Fließvorgang des Wassers dissipiert. Nur unterhalb dieser Grenztiefe sind die effektiven Spannungen größer 0. Daher ist der Boden darüber im Bruchzustand, d. h. er verhält sich wie eine Suspension.

Dieser Zustand kann auch durch die Mohr'schen Spannungskreise verdeutlicht werden: Bild 5 zeigt, dass infolge des verzögerten Porenwasserdruckabfalls der Spannungskreis der effektiven Spannungen zunächst um dasselbe Maß wie derjenige der totalen Spannungen verschoben wird. Abhängig vom Ausgangsspannungszustand kann daher die Mohr'sche Bruchgrenze erreicht werden, der Boden ist im Bruchzustand bzw. er wird „verflüssigt“. Aus Bild 5 kann leicht der positive Einfluss einer Kohäsion erkannt werden (die Bruchgrenze ist auf der x-Achse nach oben verschoben) oder einer Oberflächenlast (der Ausgangsspannungszustand ist nach rechts auf der Spannungsachse verschoben). Letzteres wurde auch von Zen (2000) berichtet, wo eine verflüssigte Zone im Meeresuntergrund vor dem Fuß eines geschütteten Wellenbrechers entstand, jedoch nicht unter dem Fuß.

Das Ergebnis der theoretischen Betrachtung ist bekannt: Ein feinkörniger kohäsionsloser Boden ohne eine Schutzschicht wird verflüssigt, wenn ein plötzlicher Wasserspiegelabsenk auftritt. Die Verflüssigung führt zu einer böschungsabwärts gerichteten Verlagerung und zu einer Abflachung, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Treten zusätzlich Strömungen auf, wird ein verflüssigtes Material erodiert.

5 Countermeasures

5.1 General aspects

To avoid instabilities due to excess pore water pressures and liquefaction as a result, two general possibilities are offered: stress (load) has to be reduced or resistance has to be increased.

To reduce the load, river training measures are built or special systems are installed at the structure to be protected that improve the flow pattern.

To increase the strength, armour layers are put on the surface that is loaded by waves, draw down or currents. To reach a stable system, it is not sufficient just to cover the surface to protect the bank from the hydraulic impact. Rather, the stability of the subsoil has to be checked, as it has been pointed out above.

To achieve stability, two essential parts are necessary: a filter and an armour layer. The filter keeps the grains in place and the armour layer contributes the necessary weight, the necessity of which has been shown in section 4. An armour layer alone won't work, since either the armour elements sink into the fluidised soil or the soil is washed through the armour layer. So the filter is needed. A filter not only hinders the fine grains of the subsoil surface to be washed through the armour layer. It also prevents soil loss in the case of piping, i.e. if the subsoil is endangered by migration of fines through a skeleton of coarser soil particles. A filter will not stop migration but it will stop soil loss at the surface or at the interface of subsoil and armour layer. A filter can either be a granular or a geosynthetic filter. Often it is necessary to place the filter under water, which incorporates problems for both types.

5.2 Placing geotextile filters under water

In coastal protection works, the traditional type of bottom protection is the fascine mattress. Usually, a woven geotextile is chosen as a filter with fascines tied on it, dragged to the place where it is to be sunk and stones dumped on it. This method is applicable on a horizontal sea floor or on mild slopes. But since the geotextile is usually a woven fabric, it is thus more difficult to design it correctly as a filter. A second argument against wovens is the low friction angle. Thus with increasing steepness, the danger of sliding of the mattress increases.

In rivers, a geosynthetic filter is often used. The simple method of placing a geosynthetic filter cloth (woven or nonwoven, without fascines), as applied in ponds, lakes and canals, will be impossible in many cases because of the depth of the water, the current or the wave action. Something is needed that holds the filter in place until it is protected by the armour layer.

5 Gegenmaßnahmen

5.1 Grundsatzfragen

Um Versagenszustände infolge von Porenwasserüberdruck und Verflüssigung zu vermeiden, gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten: entweder muss die Belastung reduziert oder der Widerstand erhöht werden.

Um die Belastung zu reduzieren, werden flusslenkende Maßnahmen ergriffen, oder es werden besondere Systeme an den zu schützenden Bauwerken installiert, um die Fließvorgänge zu optimieren.

Um die Widerstände zu erhöhen, werden Deckschichten auf einer Oberfläche aufgebracht, die durch Wellen, Absenk oder Strömung belastet ist. Um einen stabilen Zustand zu erreichen reicht es jedoch nicht aus, nur die Oberfläche vor hydraulischen Lasten zu schützen. Vielmehr ist es erforderlich, die Stabilität des Untergrundes zu prüfen, wie oben ausgeführt wurde.

Um Standsicherheit zu erreichen, sind zwei wesentliche Bauteile erforderlich: Ein Filter und eine Deckschicht. Der Filter hält die Bodenpartikel zurück und die Deckschicht liefert die erforderliche Auflast, die in Abschnitt 4 beschrieben wurde. Eine Deckschicht ohne Filter reicht nicht, da entweder die Deckschichtelemente in die verflüssigte Bodenschicht einsinken oder der Boden durch die Deckschicht ausgespült wird. Deshalb ist ein Filter erforderlich. Der Filter verhindert nicht nur, dass die geringen Korndurchmesser des Bodens durch die Deckschicht hindurchgespült werden. Er verhindert ebenfalls einen Bodenverlust im Falle der Suffosion, d. h. wenn im Boden ein Transport von Feinkorn durch das Skelett von größeren Körnern erfolgen kann. Der Filter wird diese Verlagerung nicht verhindern, aber den Bodenverlust durch die Deckschicht. Der Filter kann als Kornfilter oder als geotextiler Filter ausgeführt werden. Häufig ist es erforderlich, den Filter unter Wasser einzubauen, was zu besonderen Problemen für beide Filterarten führt.

5.2 Einbau geotextiler Filter unter Wasser

Im Küstenschutz ist das Sinkstück die typische Sohl-sicherung. Üblicherweise wird ein Geotextilgewebe als Filter und Trägermaterial mit darauf gebundenen Faschinen hergestellt, zum Einsatzort geschleppt und dort abgesenkt, indem Steine darauf gestürzt werden. Diese Sicherung kann auf horizontalem und leicht geneigtem Untergrund angewandt werden. Da meistens ein gewebtes Geotextil verwendet wird, ist es schwierig, dieses als Filter zu bemessen. Ein zweites Argument gegen gewebte Geotextilien ist der geringere Reibungsbeiwert. Dadurch steigt mit zunehmender Böschungsneigung die Gefahr des Abrutschens des Sinkstückes.

Formerly, the stability of the fabric was increased by attaching heavy iron chains at the edges of the filter cloth (Zanke, 1994), which made the placement quite complicated. Since ca. four years ago, a 'sandmat' may be a solution in such cases. Two nonwovens or a woven and a nonwoven with sand in-between are stitch-bonded or sewn together to form a heavy, filtering geocomposit. This composite geotextile has a sufficient stability when loaded by currents up to approx. 1 m/s. At the geotextile-subsoil interface a nonwoven fabric should be used because of the higher angle of friction compared to woven geotextiles.

5.3 Placing granular filter

As to granular filters, placement is similarly difficult. At first glance, it seems to be easy to place a mineral filter layer by just dumping it on the surface to be protected. The difficulties start with the gradation. Only very narrowly graded material can be used. When dumping a broadly graded filter material, the finer fraction takes longer to reach the bottom than the coarser fraction, causing material segregation. Thus a 'reverse filter' will be created: the fine material on top, where it may easily be eroded, and the coarse material below, unable to retain the fine sand of the subsoil. If a narrowly graded material is used, a larger number of layers with increasing grain diameter is needed to create a graded filter. This would increase the costs significantly, and it would cause problems, if a required water depth has to be maintained.

Another major problem remains: the first filter layers often consist of small grain sizes, so the material may be eroded nearly as easily as the subsoil.

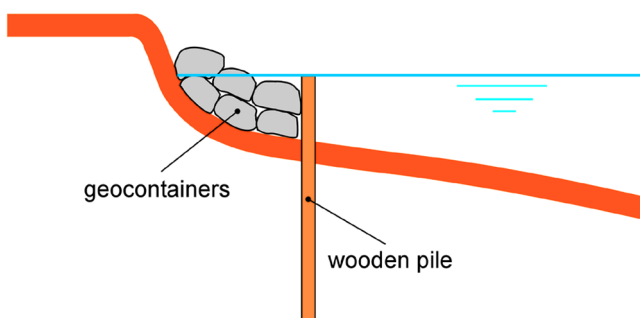


Figure 6: Temporary scour repair using geosynthetic containers

Bild 6: Vorübergehende Kolk-Reparatur unter Verwendung eines geotextilen Containers

In Flüssen wird häufig ein geotextiler Filter eingesetzt. Allerdings ist ein einfaches Verlegen der geotextilen Filter (gewebt oder mechanisch verfestigt, ohne Faschinen), wie es in Seen und Kanälen angewandt wird, in vielen Fällen infolge der Wassertiefe, der Fließgeschwindigkeit oder der Welleneinwirkung nicht möglich. Meist sind Zusatzmaßnahmen erforderlich, um den Filter in Position zu halten, bis er durch eine Deckschicht geschützt ist.

Bei früheren Anwendungen wurde die Lagestabilität des Geotextils dadurch erhöht, dass Eisenketten am Rand der Geotextilbahn befestigt wurden (Zanke, 1994), was allerdings das Verlegen erheblich erschwerte. Seit ungefähr vier Jahren steht mit der sogenannten „Sandmatte“ eine gute Lösung zur Verfügung. Zwei Geotextilschichten mit einer Sandlage dazwischen werden vernadelt oder vernäht, um so einen schweren aber filterfähigen Geoverbundstoff zu erzeugen. Dieser Verbundstoff erweist sich als ausreichend stabil gegenüber Fließgeschwindigkeiten bis ungefähr 1 m/s. An der Grenzschicht Geotextil-Boden sollte ein vernadeltes Geotextil eingesetzt werden, da es einen höheren Reibungswiderstand bietet als gewebte Geotextilien.

5.3 Einbau von Kornfiltern

Der Einbau von Kornfiltern ist ähnlich schwierig. Im ersten Augenblick erscheint es einfach, einen Mineralfilter einzubauen, indem man ihn auf die zu schützende Fläche verklappt. Das Problem ist die Kornverteilung, denn nur Materialien mit sehr steiler Kornverteilung können verwendet werden. Bei Filtermaterialien mit einer weiter gestuften Kornverteilung bräuchten Partikel mit kleinerem Korndurchmesser länger, um die Sohle zu erreichen als die größeren Fraktionen, d. h. das Material würde sich entmischen. Dadurch entstünde ein umgekehrter Filter: das Feine nach oben, wo es leicht erodiert werden kann und das Grobe nach unten, das nicht in der Lage wäre, das Feinmaterial des Untergrundes zurückzuhalten. Wird ein Material mit enger Kornverteilung gewählt, so ist unter Umständen eine große Anzahl von Lagen mit zunehmendem Korndurchmesser erforderlich, um ein Filtersystem aufzubauen. Das erhöht die Kosten deutlich und führt außerdem dann zu Problemen, wenn eine bestimmte Wassertiefe eingehalten werden muss.

Bei Kornfiltern bleibt ein weiteres Problem, das auch das Verlegen von Geotextilfiltern erschwert oder verhindert: Die ersten Filterlagen bestehen häufig aus so kleinen Korndurchmessern, dass das Material fast genauso leicht wie der Untergrund durch die Strömung erodiert wird.



Figure 7: Filling plant for geosynthetic containers

Bild 7: Abfüllanlage für geotextile Container

5.4 Geosynthetic containers: Easy placement and reliable filter

As explained above, geosynthetic cloth (geotextile filter, fascine mattress) can often not be placed properly and a granular filter would be eroded before a protection layer is placed upon it. Armour material, e.g. rip rap, would be stable against the currents, but would not provide the filter stability necessary to prevent erosion of the subsoil. So elements are needed that combine the filter capacity with sufficient weight to resist the hydraulic load.

Such elements are available in the form of geosynthetic containers (Figures 6, 7). Such containers were developed from the original sand bags and they summarise today all elements that use a geosynthetic fabric as wrapping material. Often, additional functions are provided like filtering, reinforcing or else. Sandbags have been known for a long time, for example as immediate scour repair of dikes, protection during floods etc. Today, bags of all sizes and of many shapes can be manufactured and specially designed geosynthetics may be used.

For the individual application, geosynthetic containers can be chosen, that combine the resistance against hydraulic loads and the filtration capacity demanded. Geosynthetic containers have proved to give sufficient stability against erosive forces in many applications. Their size has to be chosen such that the expected hydraulic load will not transport the container. For special applications, very large containers – as large as a hopper barge – are used (Figure 8). The whole ship's hold is lined by the geotextile, the hold is filled, then the geotextile is sewn and dumped on the sea bottom. In this way, artificial reefs can be built, or longitudinal dikes, or further to form an active scour protection.

A nonwoven fabric with a higher angle of friction than a woven product should be chosen, if stability against sliding of the geocontainers has to be guaranteed.

5.4 Geotextile Container: Verlässliche Filter, leicht zu verlegen

Wie oben gezeigt, können Geotextilien (Geosynthetische Filter, Sinkstücke) häufig nicht ohne Zusatzmaßnahmen verlegt werden und Kornfilter würden erodiert, bevor eine Deckschicht aufgebracht werden kann. Ausreichend schwere Deckschichtelemente, wie z. B. Wasserbausteine, wären gegenüber einer Strömung ausreichend stabil, können aber nicht als Filter wirken, um die Erosion des Untergrundes zu verhindern. Daher sind Elemente erforderlich, die ein Filtrationsvermögen mit ausreichendem Gewicht verknüpfen, um den angreifenden hydraulischen Lasten widerstehen zu können.

Elemente dieser gewünschten Art sind in der Form von geotextilen Containern verfügbar (Bilder 6 und 7). Unter dem Begriff werden heute alle Elemente zusammengefasst, die ein Geotextil als Hüllstoff verwenden. Häufig können zusätzliche Anforderungen abgedeckt werden, wie Filterfähigkeit, Bewehrung o. Ä. Sandsäcke sind seit langer Zeit bekannt, z. B. als sofortige Kollsicherung an Deichen, als Schutzmaßnahme für Hochwasser usw. Heute können „Säcke“ in jeder Größe und vielen Formen hergestellt und auf bestimmte Anforderungen bemessen werden.

Für den entsprechenden Anwendungsfall können geotextile Container gewählt werden, die einen ausreichenden Widerstand gegen die hydraulische Belastung und die geforderte Filterfähigkeit vereinigen. Geotextile Container haben inzwischen in zahlreichen Anwendungen ihren Widerstand gegen Erosionsangriffe bewiesen. Ihre Größe muss so bemessen sein, dass der erwartete hydraulische Angriff die Container nicht verlagert. Für besondere Anwendungen können sehr große Container hergestellt werden, wenn erforderlich so groß wie eine Klappschute (Bild 8). Dabei wird der gesamte Laderaum der Schute mit einem Geotextil ausgekleidet, der Laderaum wird gefüllt, das Geotextil wird zusammengenäht und dann auf den Meeresgrund verklappt. Mit dieser Methode lassen sich künstliche Riffe herstellen oder Längswerke oder andere Bauwerke, um eine aktive Kollsicherung durch Strömungslenkung zu erreichen.

Muss eine gewisse Gleitsicherheit der geotextilen Container gewährleistet sein, so sind Vliesstoffe den gewebten Geotextilien infolge des höheren Reibungswinkels vorzuziehen. Darüber hinaus können Vliesstoffe infolge ihrer hohen Dehnfähigkeit große Verformungen ohne Bruch ertragen. Außerdem lassen sich Vliesstoffe besser als Filter bemessen.

Um die Schutzwirkung noch zu erhöhen, können richtig bemessene Kornfilter-Gemische in geotextilen Containern verklappt werden. Da der Kornfilter in dem Container gehalten wird, tritt keine Entmischung beim Verklappen auf. Damit wird durch den Einsatz von Kornfiltern als Füllung von filterrichtig dimensionierten geotextilen Containern eine doppelte Sicherheit erreicht.



Figure 8: Large geosynthetic containers (Photo: Colcrete - von Essen)

Bild 8: Große geotextile Container (Photo: Colcrete - von Essen)

Additionally, the high straining capacity of the nonwoven allows for large deformation without failure, and the nonwoven usually performs better as a filter, when designed accordingly.

To improve the system, granular filter material can be dumped in the geosynthetic container. Enclosed in the geotextile container, a granular filter material can be dumped without segregation. Such placing of granular filter material in a geocontainer made from nonwoven filter cloth provides a double line of defence.

6 Summary

Scour is mainly dealt with in hydraulic engineering. The geotechnical aspects have been considered only more recently. But experience shows that such aspects may add the missing information. It is predominantly the interaction of free water and pore water that contributes to the stability of the soil skeleton of the subsoil. Excess pore water pressure reduces the soil stability and may result in liquefaction of the soil and thus in erosion and/or bank failure.

As a countermeasure, a filter is needed to stop erosion or the migration of soil particles and an armour is needed to guarantee a sufficient state of stress in the subsoil.

In most cases, it is rather difficult to place the filter, since neither a grain filter nor geotextile filters can resist the current. A promising development is the "sandmat", which is able to withstand at least mild currents. A relatively new method that overcomes the disadvantages mentioned above is to use geosynthetic containers. They are sufficiently heavy for not being eroded immediately after the placement, they act as a filter themselves and they allow a grain filter to be placed without segregation. They provide a twofold filter barrier when the geotextile cover is designed as a filter and the container is filled with filter material.

6 Zusammenfassung

Der Prozess der Kolkbildung wird bislang fast ausschließlich aus hydraulischer Sicht betrachtet. Geotechnische Aspekte werden dabei nur in jüngster Vergangenheit in Betracht gezogen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese Aspekte zusätzliche Informationen liefern können. Es ist vor allem die Wechselwirkung zwischen freiem Wasser und Porenwasser, die die Stabilität des Bodengerüsts des Untergrundes beeinflusst. Ein dabei entstehender Porenwasserüberdruck verringert die Stabilität des Untergrundes und kann zur Verflüssigung des Bodens damit zur Erosion oder zum Böschungsversagen führen.

Als Gegenmaßnahme ist zunächst ein Filter gefordert, der die Erosion oder die Verlagerung von Bodenpartikeln verhindert. Ferner ist eine Deckschicht erforderlich, die einen ausreichenden Spannungszustand im Untergrund durch ein entsprechendes Gewicht herstellt.

In vielen Fällen ist es sehr schwierig, einen Filter einzubringen, da weder ein Kornfilter noch ein geotextiler Filter einen ausreichenden Widerstand gegen strömendes Wasser bietet. Eine vielversprechende Entwicklung ist die „Sandmatte“, die zumindest leichten Strömungen widerstehen kann. Ein relativ neues Verfahren vermeidet alle Nachteile der zuvor genannten Methoden, nämlich der Einsatz von geosynthetischen Containern. Diese Elemente sind schwer genug, um nicht sofort verlagert zu werden, und sie wirken - entsprechend dimensioniert - als Filter. Sie erlauben es außerdem, sogar einen weitgestuften Kornfilter ohne Entmischung zu verklappen. Wenn das Geotextil ebenfalls als Filter dimensioniert ist, wird eine doppelte Sicherheit gegen unerwünschte Bodenverlagerung erreicht.

7 Danksagung

Der Autor dankt Prof. Nago von der Okayama Universität, Japan, und Dr. Hofmanns vom Niederländischen Rijkswaterstaat für die fruchtbare Diskussion über die in diesem Text behandelten Vorgänge.

7 Acknowledgement

The author wishes to thank Prof. Nago, Okayama University, Japan, and Dr. Hoffmans, Dutch Ministry of Transport Public Works and Water Management, Road and Hydraulic Engineering Division, The Netherlands, for their discussion on the topics treated in this paper.

8 References / Literatur

Annandale, G. W.: Erodability. In: Journal of hydraulic research, Vol. 33 No. 4, 1995, pp. 471-494

Briaud, J.-L.; Chen, H.-C.; Ting, F.: The EFA, erosion function apparatus: an overview. In: Briaud (Ed): Scour of Foundations, Proceedings Int. Symp. Melbourne, Australia, 19. Nov. 2000, pp. 80-86. College Station, USA: Texas A&M University, Dept. of Civil Engineering, 2000.

Briaud, J.-L.; Chen, H.-C.; Kwak, K.: The SRICOS method: A summary. In: Briaud (Ed): Scour of Foundations, Proceedings Int. Symp. Melbourne, Australia, 19. Nov. 2000, pp. 16-22. College Station, USA: Texas A&M University, Dept. of Civil Engineering, 2000.

Bezuijen, A.; Köhler, H.-J.: Filter and revetment design of water imposed embankments induced by wave and draw-down loadings. DeGroot, Den Hoedt, Termaat (Ed.): Geosynthetics: Applications, Design and Construction. Rotterdam: Balkema 1996, pp.1007-1023

Köhler, H.-J.: Messungen von Porenwasserüberdrücken im Untergrund. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 66, Karlsruhe (Eigenverlag), 1989.

Köhler, H.-J.; Feddersen, I.: In situ measurements of pore water pressure in soils and concrete constructions. In: G. Sörum (Ed.): Field measurements in Geotechnics. Rotterdam: Balkema, 1991, pp.107-116

Lauchlan, Ch. S.; Melville, B. W.; Coleman, S. E.: Sizing rip rap to protect against local scouring at bridge piers. In: Briaud (Ed): Scour of Foundations, Proceedings Int. Symp. Melbourne, Australia, 19. Nov. 2000, pp. 60-68. College Station, USA: Texas A&M University, Dept. of Civil Engineering, 2000.

Lauchlan, Ch. S.; Melville, B. W.: Riprap protection at bridge piers. Journal of hydraulic engineering, Vol. 127, No. 5, 2001, pp. 412-418

Mia, M.F.; Nago, H.: Prediction of bed liquefaction and local scour around bridge pier under abrupt water pressure change. In: Briaud (Ed): Scour of Foundations, Proceedings Int. Symp. Melbourne, Australia, 19. Nov. 2000, pp. 23-37. College Station, USA: Texas A&M University, Dept. of Civil Engineering, 2000.

Nago, H.; Maeno, S.: Liquefaction of highly saturated sand layer under oscillating water pressure. In: Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ., Vol. 16, No. 1, pp. 91-104, 1981.

Nago, H.; Maeno, S.: Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure. In: Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ., Vol. 19, No. 1, pp. 13-32., 1984.

Nago, H.; Maeno, S.: Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variations on its surface Natural Disaster Science 1/1987 pp. 23-35.

Schulz, H.; Köhler, H.-J.: Use of geotextiles in hydraulic constructions in the design of revetments. 3rd Int. Conf. on Geotextiles, Vienna, Austria, 1986, pp. 1185-1190

Smith: Preliminary procedure to predict bridge scour in bedrock. Colorado department of transportation, report no. CDOT-R-SD-94-14, 1994

Yu, Y.; Maeno, S.; Nago, H.: Progressive liquefaction process of loosely deposited sand bed under oscillating water pressure on its surface. To be published in: Journal of Geotechnical Engineering 2001

Zanke, U.: Wissenschaftliches Gutachten über die Lagestabilität von Filtermatten unter Strömungseinfluss. Expertise commissioned by NAUE Fasertechnik, Lübecke, Germany, 1992.