

Stabilisierung von Einschnittböschungen mittels Wasserdruckentlastung im stationären und instationären Strömungszustand

Hans-Jürgen Köhler¹⁾, Roland Schulze²⁾

¹⁾ Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

²⁾ Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe

1 Einführung

Wie die Erfahrung zeigt, können Einschnittböschungen in Tonböden oft auch noch nach vielen Jahren Standzeit zur Instabilität tendieren. Diese Tatsache ist ein bekanntes Phänomen, das seit vielen Jahrzehnten Gegenstand der Forschung ist. Obwohl bereits große Fortschritte beim Verständnis der einwirkenden Versagensprozesse zu verzeichnen sind, ist eine konkrete Angabe zum bevorstehenden Bruch einer Böschung oft nicht hinreichend möglich. Brüche kündigen sich jedoch oft durch vorauslaufende Verformungen an, die es dem aufmerksamen Beobachter gestatten, Sicherungsvorkehrungen einzuleiten. Das nachfolgend beschriebene Verfahren einer Sicherung mittels Druckentlastungsbohrungen kann Schadenswirkungen vorbeugen und zur Sanierung rutschgefährdeter Böschungen beitragen. Konstruktive Hinweise zur Bemessung und Herstellung der Druckentlastungsbohrungen werden gegeben. Vorliegende Messergebnisse werden dargestellt und diskutiert.

Das Sicherungsverfahren und dessen Wirksamkeit werden am Beispiel einer Anfang des 20. Jahrhunderts in der Nähe des Ortes Lühnde (Niedersachsen) am Stichkanal Hildesheim (SKH) hergestellten Einschnittböschung beschrieben. Der hier untersuchte Einschnitt ist bis zu 20 m tief und führt einen schiffbaren Kanal durch einen Geländerücken. Bereits während der Herstellung des Einschnittes kam es zu ersten Rutschungen. Nachdem in der Folgezeit diese extrem steilen Böschungsneigungen vermindert wurden, konnte der Einschnitt zwar fertiggestellt werden, jedoch kam es nachfolgend wiederholt zu Böschungsbrüchen, die weitere Abflachungen erforderlich machten. Gegenwärtig liegt die Böschungsneigung bei etwa 1 : 3. Seit 1995 wurden im Zusammenhang mit einer geplanten Kanalvertiefung erneut geotechnische Untersuchungen durchgeführt. Der anstehende Boden aus steifem bis halbfestem Ton des unteren bzw. mittleren Jura ist überkonsolidiert und besteht kornanalytisch aus 40 % Ton und 60 % Schluff. Die Plastizitätsgrenze liegt bei etwa 22 %, die Ausrollgrenze bei 58 %. Schmale Tonsteinbänder sind

Wird der Gehalt an mikroskopisch kleinen Gasblasen im natürlichen Porenwasser berücksichtigt, macht es Sinn, die Einflusszone der ungesättigten Bodenverhältnisse auch auf Bodenbereiche unterhalb des Wasserspiegels zu erweitern. Indem man einen druckabhängigen Sättigungsgrad S in die Betrachtung unterhalb des Wasserspiegels einführt, kann gezeigt werden, dass eine Übergangszone zwischen dem ungesättigten Bereich oberhalb des Wasserspiegels und einer tief liegenden völlig gesättigten Bodenzone definiert werden kann (Köhler et al. 1999a, Schwab et al. 2004).

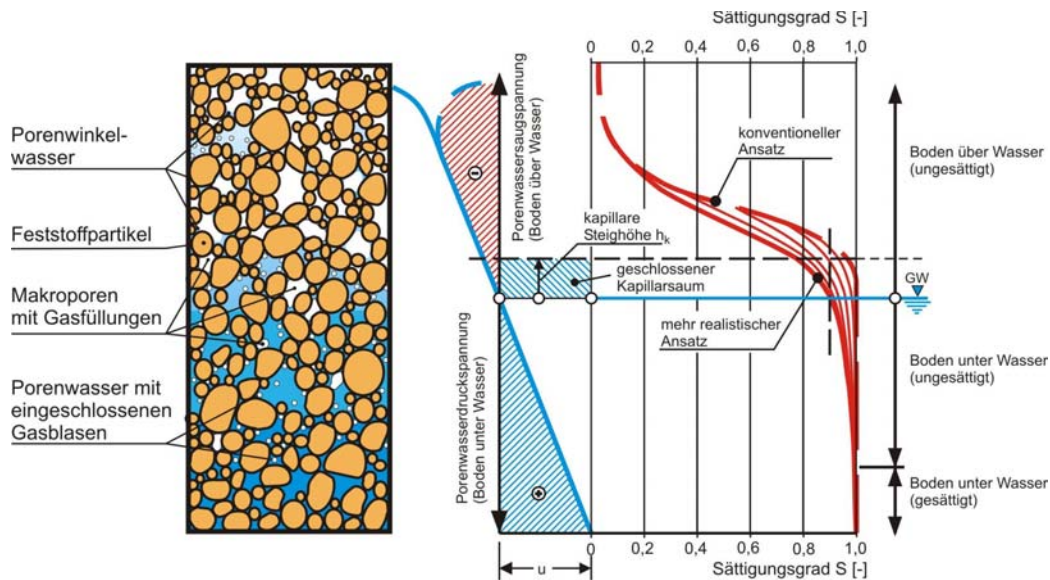


Abb. 2: Schematischer Schnitt durch Boden oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels (links) sowie des Sättigungsgrades S , verteilt über die Tiefe, vom ungesättigten zum gesättigten Bodenbereich (rechts)

Abbildung 2 zeigt einen schematischen Schnitt durch den Boden oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels (piezometrische Druckhöhe). Die Lage des Wasserspiegels (piezometrische Linie) ist definiert als der Ort, an dem der Porenwasserdruck (PWD) gleich dem Atmosphärendruck ist. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Bodenzone, in denen die Poren entweder vollständig mit Wasser gefüllt sind (kontinuierliche Wasserphase) oder den Porenraum nur unvollständig ausfüllen (diskontinuierliche Wasserphase) bis hin zur Bodenzone oberhalb des Wasserspiegels, deren Poren hauptsächlich vom Porenmedium Gas ausgefüllt sind (kontinuierliche Gasphase).

Durch den in der kontinuierlichen Wasserphase eingeschlossenen Gasanteil (Gasblasen und gasgefüllte Makroporen) wird das Porenmedium unterhalb des Wasserspiegels mehr kompressibel, verglichen mit dem Porenfluid im tiefer gelegenen Boden der völlig gesättigten Bodenzone. In diesem tiefliegenden Bodenbereich unterhalb der Übergangszone des noch ungesättigten Porenmediums unter Wasser sind die eingeschlossenen Gasblasen infolge des hohen Wasserdruckes dort schon kollabiert. Erst ab dieser Tiefe ist der Boden vollständig wassergesättigt ($S = 1$).

Der Bodenbereich oberhalb des Wasserspiegels besteht ebenfalls aus zwei Zonen. Zum einen gibt es eine ungesättigte Wasserphase in der sogenannten geschlossenen Kapillärzone mit einem vollständig gefüllten Porenmedium, das ebenso wie in der Übergangszone unter Wasser Gasblasen und Makroporen enthält. Zum anderen schließt sich darüber die Zone des Bodenbereichs mit der kontinuierlichen Gasphase im Porenraum des Bodens oberhalb des geschlossenen Kapillarsaumes an. Diese ungesättigte Bodenzone der kontinuierlichen Gasphase mit unregelmäßig verteilten Wasseranteilen wird vom Atmosphärendruck kontrolliert.

Die Linie, an der der Wasserdruck dem Atmosphärendruck entspricht, wird als piezometrische Linie definiert ("p=0-Linie", oder auch "Sickerlinie" bzw. "Grundwasserspiegel" (GW) genannt) und legt damit die Höhenlage des Wasserspiegels fest.

In Abbildung 2 (mittlerer Bildteil) wird der Boden unterhalb dieser Linie damit in die Porenwasserdruckzone (positive Wasserspannung) und oberhalb des Wasserspiegels in die Saugspannungszone (negative Wasserspannung) unterteilt. Durch klimatische Einflüsse kann es zu erheblichen zeitlichen Abweichungen in der Spannungsverteilung des Porenwassers kommen, weshalb sogenannte hydrostatische Wasserdruckverteilungen oft nicht zwingend gegeben sein müssen, wenn externe Druckänderungen auf das wassergefüllte Bodensystem oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels einwirken.

Unterhalb des Grundwasserspiegels bzw. an der Grenze zwischen Wasser und Boden kann mit einer besser zutreffenden Annahme der Eingangssättigungsgrad S_0 zwischen 0,9 und 1,0 angesetzt werden. Mit zunehmender Bodentiefe steigt der Sättigungsgrad S im Boden unter dem Wasserspiegel mit dem sich vergrößernden Wasserdruck an und erreicht je nach Größe und Verteilung des jeweils örtlich vorhandenen Gasanteils in unterschiedlichen Bodentiefen unterhalb des Wasserspiegels den völligen Sättigungszustand $S = 1$.

Bei Berücksichtigung des Dreiphasensystems, bestehend aus Wasser, Bodenpartikeln und fein verteilten Gasblasen im Porenwasser, kann das mechanische Verhalten dieser Böden auch rechnerisch durch Anwendung der Konsolidationsgleichung von Biot (1941) modelliert werden.

Extern einwirkende Druckänderungen, wie z. B. oszillierende Wasserspiegel, Grundwasserabsenkungen und sogar barometrische Luftdruckänderungen, haben damit zusätzliche Auswirkungen auf die Standsicherheit und das Verformungsverhalten von Böschungen, Baugruben und Gewässersohlen (Köhler et al. 1999a, Köhler 2003, Vulliet et al. 2002).

Während solcher Belastungssituationen ändern sich die Fließbedingungen im Porenwasser vom stationären in den instationären (transienten) Porenwasserfluss. Die Speicherung im wassergefüllten Porenmedium führt zu einer Dämpfung der Porenwasserdruckausbreitung im Boden, wodurch der Porenwasserüberdruck oftmals bestimmend wird hinsichtlich der Verformungen und des Versagens des Bodens.

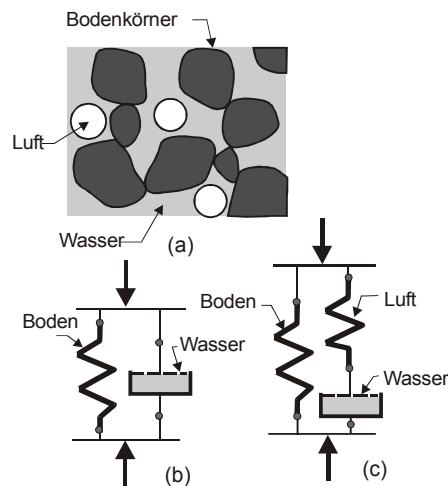


Abb. 3: a) Mikrostruktur eines ungesättigten Bodens unter Wasser
 b) mechanisches Modell für den vollgesättigten Boden
 c) mechanisches Modell für den ungesättigten Boden

In Abbildung 3 ist die Mikrostruktur dieser Böden schematisch dargestellt. Die Kompressibilität eines vollgesättigten Bodens ist von der zeitabhängigen Verteilung der Belastung zwischen der Feststoffphase und der nahezu unzusammendrückbaren Porenwasserphase bestimmt. Abbildung 3b zeigt das klassische mechanische Modell dieses Verhaltens. Im ungesättigten Zustand (Abb. 3c) wird aus dem quasi inkompressiblen Porenwasser (ohne Gasanteil) eine kompressible Wasser-Luft-Mischung, die das Verformungsverhalten des gesamten Systems (Boden und Wasser) drastisch verändern kann. Dies gilt auch unter undrännierten Bedingungen. Weiterführende Hinweise zur rechnerischen Erfassung der Kompressibilität des Porenwassers sind in Köhler (2001), Köhler et al. (2002), Köhler et al. (2006) und EAU (2004) enthalten.

2 Beschreibung der angewandten Druckentlastungsmethode

Die vorgeschlagene Methode der Böschungsstabilisierung beruht auf dem Prinzip der Porenwasserdruckentlastung. Im allgemeinen wird oft angenommen, dass ein Drän sichtbar Wasser führen muss, um wirksam zu sein. Im Umkehrschluss wird oft fälschlicherweise argumentiert, dass ein trockener Drän nicht wirksam sein kann. Bei der Beurteilung der Wirksamkeit eines Dräns ist jedoch zu beachten, dass insbesondere in gering durchlässigen Böden sogar die Entnahme geringster Wassermengen (z. B. Verdunstung von Bodenfeuchtigkeit im Dränrohr) einen Porenwasserdruckabbau in der unmittelbaren Umgebung des Dränrohres bewirkt.

Um die Standsicherheit einer instabilen Böschung durch die Anordnung von Druckentlastungsbohrungen zu erhöhen, sind folgende Aspekte wesentlich: Ein Porenwasserdruckabbau kann unabhängig von der Neigung des Dränrohres und dem Wasserstand im Dränrohr erfolgen. Darüber hinaus sind instationäre

Zustände zwischen der ursprünglichen Porenwasserdruckverteilung und dem stationären Endzustand in die Betrachtung einzubeziehen. In den Entwurf der Hangstabilisierung sind Überlegungen einzuführen, die auf der praktischen Anwendung des Dreiphasensystems beruhen. Erläuterungen hierzu finden sich im Abschnitt 1.1. Aus diesen Erkenntnissen folgt, dass sogar in die Böschung hinein fallend geneigte Dränrohre (mit Wasser gefüllt oder nicht gefüllt), zum Porenwasserdruckabbau beitragen können. Völlig entleerte Dränrohre sind natürlich noch wirksamer, weil der Atmosphärendruck damit direkt auf den zu entlastenden Boden über die Bohrung einwirken kann. In der unmittelbaren Umgebung des Dräns können sich darüber hinaus sogar Porenwasserdrücke unterhalb des Atmosphärendruckes (Saugspannungen) einstellen, die zusätzliche Stabilisierungswirkung besitzen. Der Erfolg der Maßnahme hängt weitgehend davon ab, ob bzw. in welcher Größe der ursprünglich vorhandene Porenwasserdruck durch eine sinnvolle Anordnung der Dränrohre reduziert werden kann.

Betrachtet man ein vollständig mit Wasser gefülltes Dränrohr, so ist das Potential im gesamten Dränrohr konstant. Das Potential wird ausschließlich von der geodätischen Höhe am Austrittspunkt des Dränrohres bestimmt (dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Fließgeschwindigkeit im Dränrohr vernachlässigbar klein bleibt). In einem Dränrohr, das mit Luft gefüllt ist (d. h. das anstehende Wasser wird stets entfernt) wird das örtliche Potential als die maßgebende hydraulische Randbedingung entlang des Dränrohres von der jeweiligen örtlichen geodätischen Höhe bestimmt.

In vielen praktischen Fällen erlauben diese Zusammenhänge eine effektive Anordnung von Dränrohren im unmittelbaren Bereich potentieller Scherzonen. In Übereinstimmung mit dem Terzaghi-Prinzip (Terzaghi 1948) erhöht sich durch die Vergrößerung der effektiven Spannungen die Standsicherheit der Böschung mit dem dort sofort wirkenden Porenwasserdruckabbau.

2.1 Eignungsprüfung

Um die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Sanierungsmaßnahme nachzuweisen, wurde eine Eignungsprüfung in einer Böschung durchgeführt, in welcher bereits vorauslaufend über mehrere Jahre Böschungsbewegungen dokumentiert wurden. Die bereits bestehende Messeinrichtung wurde für die Eignungsprüfung weiter genutzt, nachdem einige notwendige Erweiterungen durchgeführt wurden.

In der gefährdeten Böschung wurden Druckentlastungsbohrungen in drei verschiedenen Neigungen fächerartig hergestellt. Abbildung 4 zeigt den Grundriss sowie verschiedene Schnitte. Jede der drei unterschiedlich geneigten Bohrpositionen wiederholt sich im Abstand von etwa 6 m. Die Anordnung der Bohrungen wurde hinsichtlich eines möglichst effektiven Porenwasserdruckabbaus im Bereich der Scherfuge optimiert.

Die im Messquerschnitt bestehende Anordnung der Sensoren wurde durch zusätzliche Porenwasserdrucksensoren erweitert, die zwischen den (zum damaligen Zeitpunkt noch nicht vorhandenen) Druckentlastungsbohrungen

eingebaut wurden. Die Sensoren wurden in möglichst großer Entfernung zu den Druckentlastungsbohrungen positioniert, um sicherheitshalber auch an Orten zu messen, die am geringsten von der Druckentlastung beeinflusst werden. Dieser Aspekt ist in Schnitt A-A (Abb. 4) dargestellt. Trotz hohem Aufwand hinsichtlich der Lage- und Richtungsgenauigkeit der Bohrungen waren Abweichungen bei der Ausführung der Bohrungen unvermeidbar, was bei der Interpretation der Messdaten zu berücksichtigen ist.

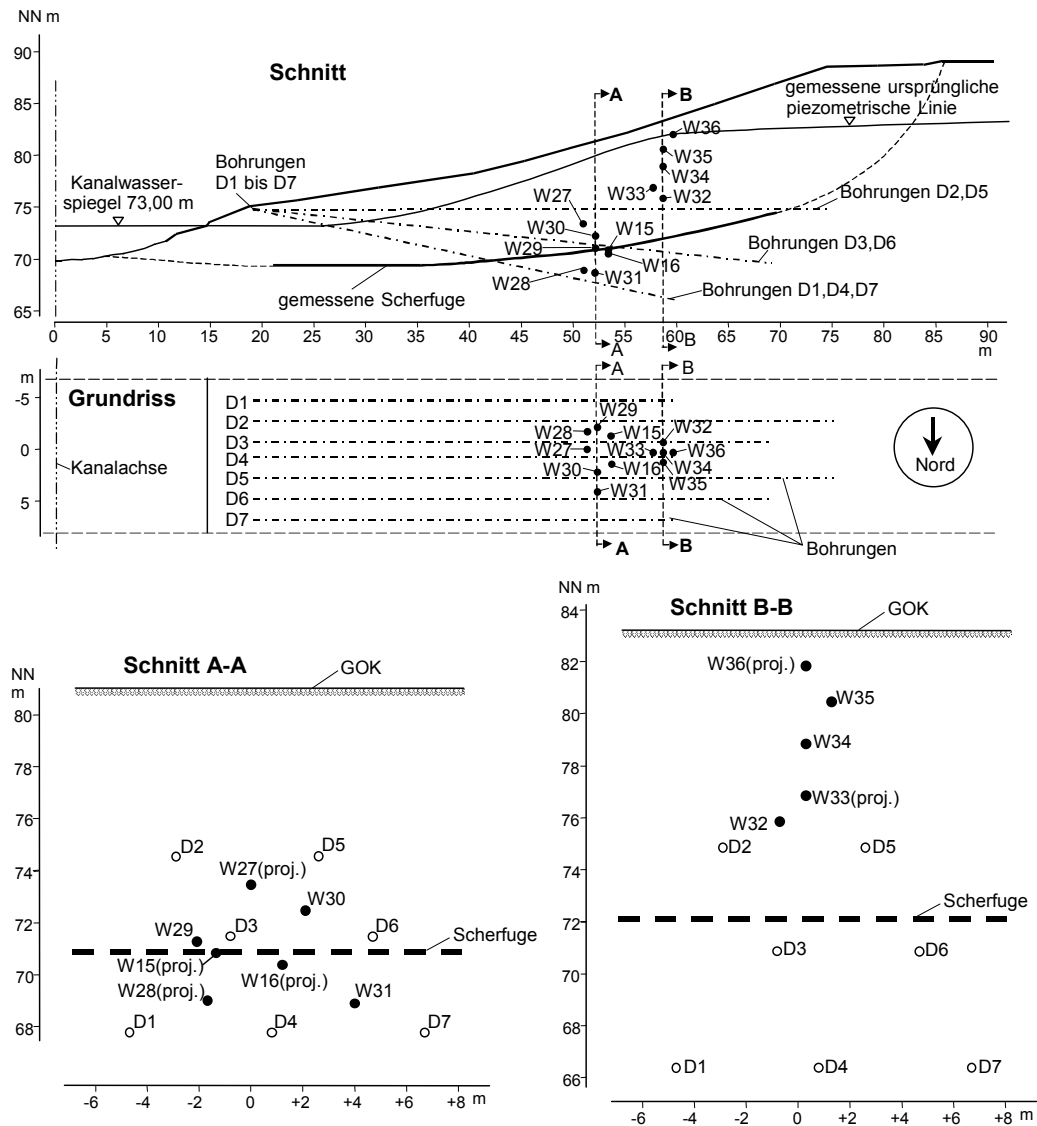


Abb. 4: Eignungsprüfung bei SKH-km 2,95 (Westufer): Lage der PWD-Sensoren (W) und der Druckentlastungsbohrungen (D)

Die verwendeten Porenwasserdrucksensoren sind Absolutdruckaufnehmer. Wie an anderer Stelle schon beschrieben (Köhler et al. 1991), wurde ein in der BAW entwickeltes und inzwischen jahrzehntelang bewährtes Porenwasserdruckmesssystem unter Verwendung von Drehpackern eingesetzt, mit welchem Porenwasserdrücke im Ton mit großer Genauigkeit und Zuverlässigkeit gemessen werden können. Die Porenwasserdrucksensoren wurden bereits Monate vor Einbau der Druckentlastungsbohrungen installiert, um zu

gewährleisten, dass die während der Herstellungsphase gemessene Porenwasserdruckentlastung repräsentativ erfasst werden konnte.

Die Druckentlastungsbohrungen wurden bis zu einer Länge von etwa 55 m in die Böschung hineinreichend hergestellt. Obwohl erwartet werden konnte, dass das Bohrloch ($d = 178$ mm) temporär standsicher sein würde, wurde aus Gründen einer durchgreifenden Qualitätskontrolle eine durchgehende Verrohrung eingebaut. Eine Spülung der Bohrungen mit Flüssigkeit wurde nicht zugelassen, stattdessen wurde das Bohrgut mit Pressluft gefördert. Nach Fertigstellung der Bohrung wurden Dränrohre DN 100 in das Bohrloch eingeschoben, die mit einem geeigneten geotextilen Filter ummantelt waren. Nachdem das Dränrohr in die Bohrung eingeschoben war, wurde die Verrohrung gezogen.

2.1.1 Abschätzung der Porenwasserdruckreduktion

Vor der Durchführung der Eignungsprüfung wurden Überlegungen angestellt, um die Geschwindigkeit der zu erwartenden Porenwasserdruckreduktion abzuschätzen. Hierbei wurde ein handelsübliches FE-Grundwasser-Programm (GGU: Gwinsta 4.02 und GW2 7.54) verwendet. Um grundlegende Beziehungen aufzuzeigen, wurde vereinfacht nur eine Dränlage im numerischen Modell untersucht. Abbildung 5 zeigt die Geometrie des Modells sowie ein Beispiel von Äquipotential-Linien, die einen instationären Zustand beschreiben. Es ist deutlich erkennbar, dass entlang eines wesentlichen Abschnittes der Scherzone der Porenwasserdruckabbau bereits stattgefunden hat, während die Lage der ursprünglichen piezometrischen Linie noch keinerlei Änderung erfahren hat.

Die dargestellte Berechnung beruht u. a. auf folgenden Annahmen:

- a) Nicht gekoppelte Berechnung (d. h. Steifigkeit E_s und Wasserdurchlässigkeit k des Bodens beeinflussen sich gegenseitig nicht und werden vereinfacht als konstant angenommen)
- b) Der Boden unter Wasser wird als Dreiphasen-Porenmedium angesetzt.

Diese Annahmen lassen Abschätzungen auf der sicheren Seite zu, d. h. die Geschwindigkeit des mit dem Dreiphasenmodell berechneten Porenwasserdruckabbaus im Boden unter Wasser erfolgt langsamer als es in der Eignungsprüfung während der Feldmessungen infolge der mit dem Bohren zusammenhängenden Bodenverformungen im unmittelbar angrenzenden Bodenbereich zu erwarten war. Weiterhin herrscht nach Herstellung der Druckentlastungsbohrungen entlang der Bohrlochwandung der Atmosphärendruck, wodurch ein schnell wirkender Druckabbau unmittelbar auf den Bodenumgebungsbereich der Bohrung einwirkt.

Während und insbesondere nach Herstellung der Druckentlastungsbohrung stellen sich im Bodenbereich in unmittelbarer Umgebung zur Bohrung instationäre Porenwasserdruckverhältnisse ein, die örtlich und zeitlich veränderlich sind. Schon geringfügige Wassermengenausstritte genügen, um einen deutlichen Abbau des Porenwasserdrucks im Boden zu bewirken.

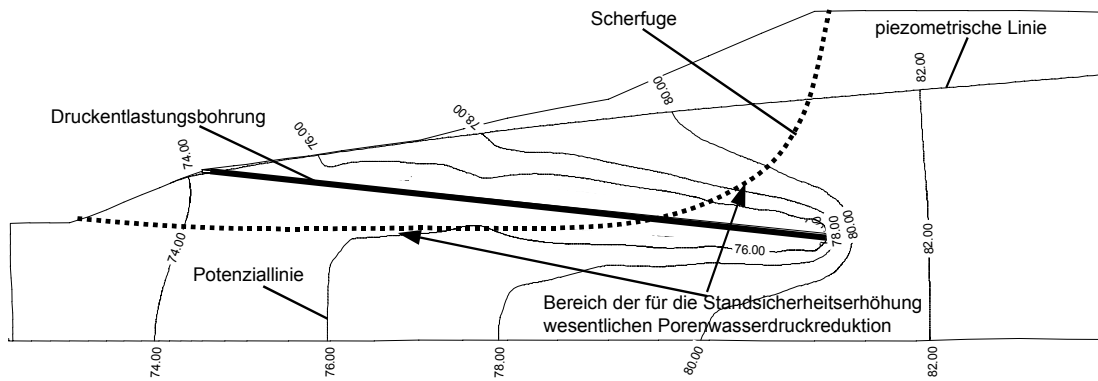


Abb. 5: Instationäre Potentialverteilung im Bereich eines flächig ausgebildeten Druckentlastungsdräns, Ergebnis einer FE-Berechnung

Die Entlastungsgeschwindigkeit v dieses Porenwasserdruckabbaus kann im Verhältnis zur hydraulischen Durchlässigkeit des Tons ($k = 10^{-10}$ m/s) als schnell bezeichnet werden ($v \gg k$). Es bleibt damit ein Porenwasserüberdruck im Boden bestehen, der entsprechend der erforderlichen Konsolidierungszeit nur langsam abgebaut werden kann. In einem solchen Zustand ist es gerechtfertigt, den noch wasserüberdruckbehafteten Boden hydraulisch wie einen gespannten Aquifer zu modellieren. Setzt man daher die hydraulischen Randbedingungen an, wie sie bei der Grundwassermodellierung für einen gespannten Grundwasserspiegel berücksichtigt werden, lassen sich die instationären Porenwasserdruckfelder numerisch berechnen. Für die Berechnung des anzusetzenden spezifischen Speicherkoeffizienten S_s wurde mit einer dränierbaren Porosität $n = 0,2$ und einem Sättigungsgrad von $S = 0,9$ gerechnet. Mit diesen Kennwerten wurde ein mittlerer spezifischer Speicherkoeffizient $S_s = 0,0035 \text{ m}^{-1}$ in die instationäre Grundwassermodellierung zur Ermittlung des Porenwasserdruckabbaus als Folge der Dränbohrungen eingeführt.

In Köhler et al. (2002, 2006) und Montenegro et al. (2003) sind weitere Hinweise zum Berechnungsvorgang unter Verwendung des Speicherkoeffizienten S_s enthalten.

2.1.2 Standsicherheitsberechnungen

Um den Einfluss der Druckentlastung auf die Standsicherheit der Böschung zu ermitteln, wurde u. a. das FE-Programm PLAXIS verwendet. Dabei wurde die Entlastungsbohrung im 2-D-Modell vereinfacht als durchgehende Dränschicht simuliert. Als Bruchkriterium wurde Mohr-Coulomb gewählt. Die über Rückrechnung ermittelten Scherparameter (Annahme: Grenzzustand $\eta = 1,0$) wurden entlang der Scherfuge als konstant angenommen, wobei die Porenwasserdruckverteilung im stationären Anfangszustand näherungsweise hydrostatisch durch die piezometrischen Linie definiert wurde (Schulze et al. 2003b). Die gemessene Lage der Scherfuge wurde durch die Rückrechnung in guter Näherung bestätigt (Abb. 6a).

Der instationäre Übergangszustand nach Installation der Bohrungen wurde näherungsweise erfasst, indem der von den Bohrungen beeinflusste Bereich mit einer mittleren Potentialhöhe von NN+75 m (entspricht einem Niveau von 0,5 m oberhalb Bohransatzpunkt) berücksichtigt wurde (Abb. 6b). Diese Druckhöhe wurde bereits etwa sechs Monate nach Einbau der Bohrungen erreicht (Abb. 7). Hierbei wurde auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass sich die Dränrohre im Laufe der Zeit bis zum Bohransatzpunkt mit Wasser füllen können.

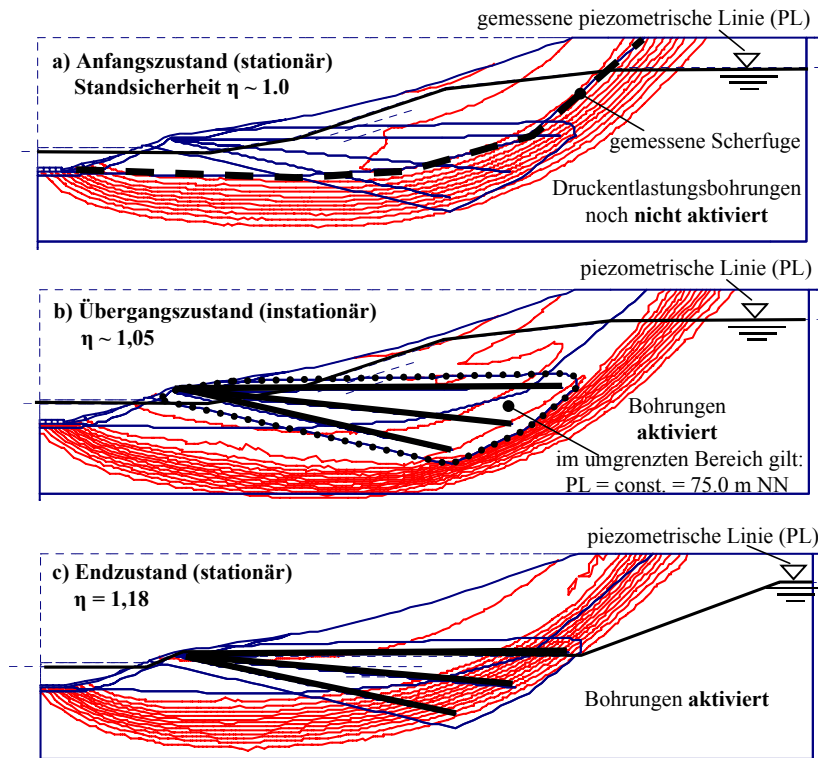


Abb. 6: FE-Ergebnisse: Linien gleicher inkrementeller Verformungen

Der Endzustand wurde erfasst, indem die piezometrische Linie im gesamten Bereich der Druckentlastungsbohrungen auf Höhe des Bohransatzpunktes (NN+74,5 m) angenommen wurde. Die Standsicherheit beträgt nach Erreichen des stationären Endzustandes etwa $\eta = 1,18$ (Abb. 6c). Die beabsichtigte Vertiefung der Kanalsohle um 0,5 m reduziert die Sicherheit um etwa 5 Prozentpunkte auf $\eta = 1,13$. Damit wird die nach Regelwerk geforderte Sicherheit zwar nicht gewährleistet, aber trotz Kanalvertiefung gegenüber dem Anfangszustand eine wesentliche Standsicherheitserhöhung erreicht. Weil weder eine Abflachung der Böschung noch andere Sanierungsmaßnahmen realisierbar sind, wird zukünftig ergänzend die Beobachtungsmethode angewendet.

2.1.3 Ergebnisse der Eignungsprüfung

Die Arbeiten zur Herstellung der Druckentlastungsbohrungen erfolgten zwischen dem 17. Dezember 2001 und dem 9. Januar 2002, mit einer Arbeitsunterbrechung zwischen Weihnachten und Neujahr. Während der Bohrarbeiten waren große Veränderungen (nach oben und nach unten) bei den

Porenwasserdrücken zu verzeichnen, was hauptsächlich auf Volumenänderungen in den Bodenbereichen nahe der jeweiligen Bohrtrasse aufgrund des Bohrvorganges zurückzuführen ist. Während des Bohrvorganges blieben die meisten Bohrungen zunächst trocken. Nachdem das Bohrloch D1 etwa 40 m tief abgeteuft war, strömte plötzlich Wasser (etwa 20-30 l/h) aus dem Bohrloch.

Als das Bohrloch D4 eine Tiefe von etwa 20 m erreichte, strömte Wasser auch aus diesem Bohrloch mit etwa der gleichen Durchflussmenge und die Bohrung D1 versiegte unmittelbar danach. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass die bereits erwähnten Schichten (Tonsteinbänder), die gelegentlich im Ton eingelagert sind, zumindest saisonal wasserführend sein können. Eine weitere Beobachtung, die diese Erklärung stützt, ist ein über den gesamten Messzeitraum beobachteter, örtlich schnell variierender Porenwasserdruck, der von Sensor W30 gemessen wurde. Vermutlich befindet sich dieser Sensor in nächster Nähe eines solchen wasserführenden Tonsteinbandes. Die Daten dieses Sensors sind in Abbildung 7 nicht berücksichtigt, da sie für die Gesamtwirkung der Porenwasserdruckentlastung von untergeordneter Bedeutung sind.

Bei gelegentlich durchgeführten Ortsbesichtigungen wurden die aus den Dräns ausfließenden Wassermengen dokumentiert. Die meisten Bohrungen liefern, wenn überhaupt, nur gelegentlich Wasser, d. h. die Wasserspenden variieren mit der Jahreszeit und betragen (als Summe aller 7 Dräns) maximal 20 l/h. Einige der Bohrungen sind relativ hoch mit Wasser gefüllt, wobei nicht abschließend geklärt werden kann, ob es sich hierbei nicht auch um von der Oberfläche her eindringendes Wasser handelt.

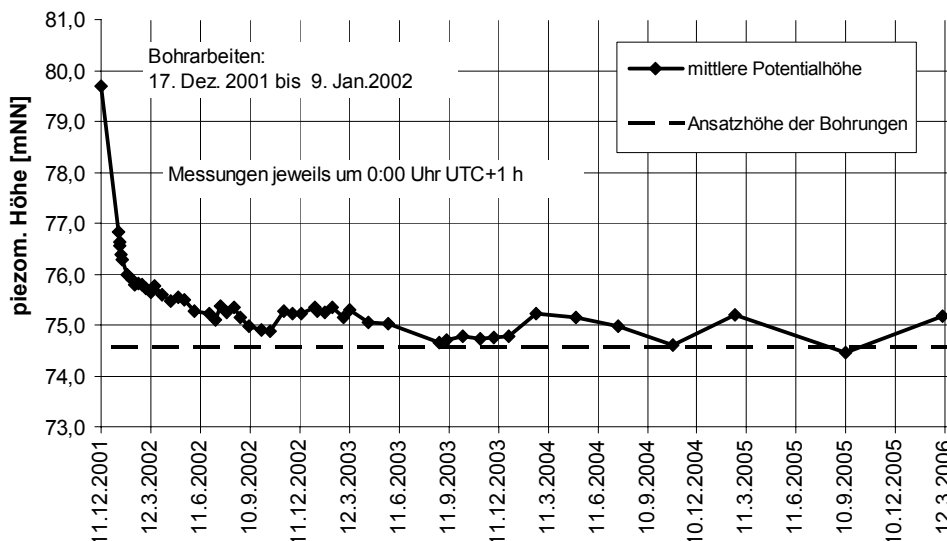


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der gemittelten piezometrischen Höhe der PWD-Sensoren im Bereich der Druckentlastungsbohrungen

Abbildung 7 zeigt die zeitliche Entwicklung der gemessenen Porenwasserdrücke. Für diese Darstellung wurden die Messwerte der in Schnitt A-A (Abb. 4) dargestellten Sensoren arithmetisch gemittelt. Die dargestellten Daten wurden aus den Originalmessungen, die alle 30 Minuten durchgeführt wurden, zufällig herausgegriffen. Von den Messdaten wurde der jeweils herrschende Luftdruck

abgezogen, wobei vereinfachend angenommen wurde, dass 100 % des Luftdruckes bereits am jeweiligen Messpunkt wirksam war, was nicht immer vorausgesetzt werden kann (Köhler et al.1999b). Es wird darauf hingewiesen, dass die dargestellten Messergebnisse aus dem genannten Grund mit einem Fehler von bis zu $\pm 0,1$ m WS behaftet sein können, was jedoch bezüglich der grundlegenden Aussagen dieses Beitrages ohne Bedeutung ist.

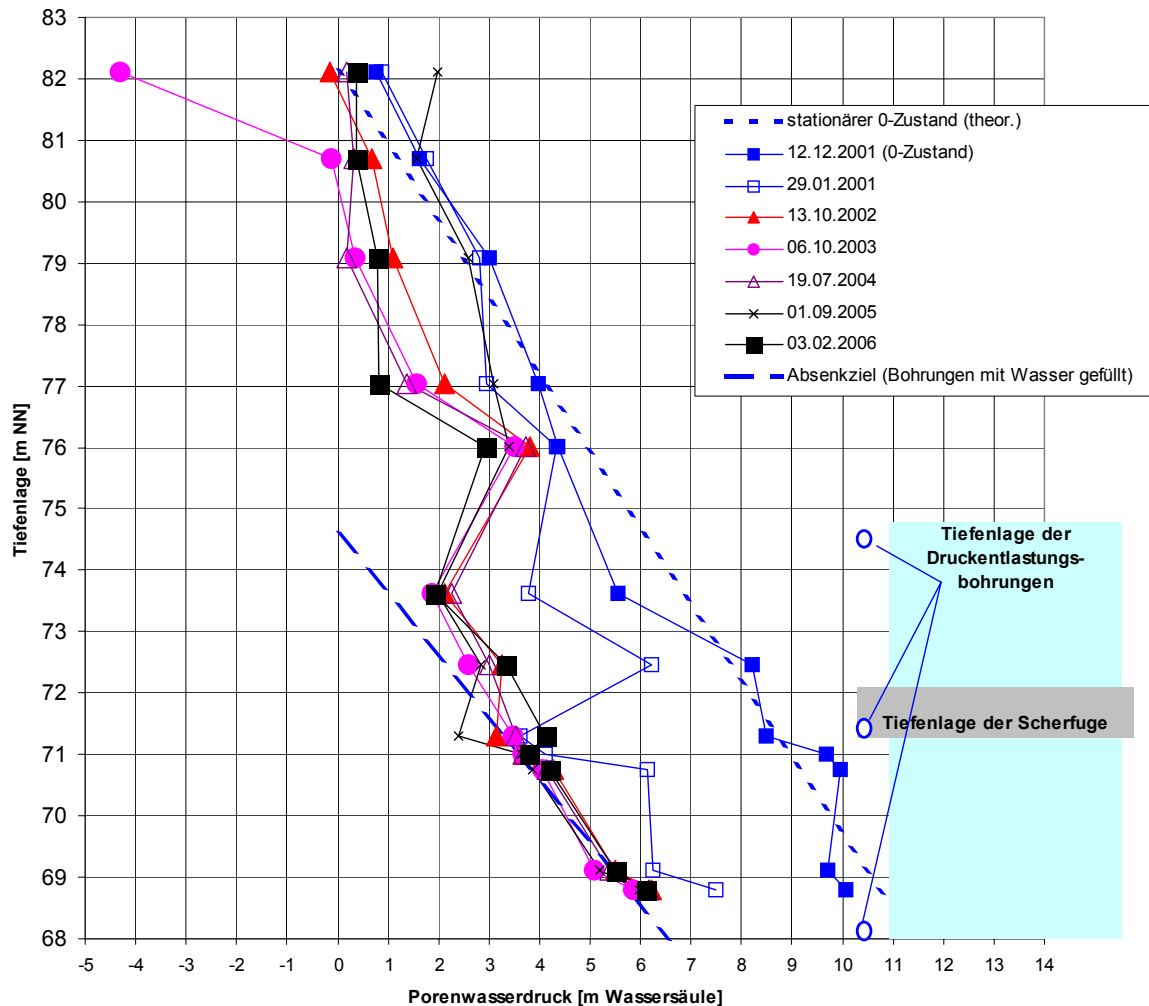


Abb. 8: Auswirkungen der Druckentlastungsbohrungen auf die PWD-Verteilung in einem vertikalen Schnitt

Vor Beginn der Bohrarbeiten für den Einbau der Dräns wurden in der Böschung hohe und relativ stabile Porenwasserdrücke beobachtet (vgl. Abb. 7 links). Diese Daten wurden zur Ermittlung der in Abbildung 4 dargestellten piezometrischen Linie herangezogen und in den Berechnungen (Abs. 2.1.2) berücksichtigt.

Es wird betont, dass die hydraulischen Verhältnisse im Boden durch die Installation der Druckentlastungsbohrungen nunmehr grundlegend verändert wurden, indem verschiedene, bereits vorhandene, Trennflächensysteme durch die eingebrachten Bohrungen künstlich miteinander verbunden wurden. Mit der Installation der Bohrungen wurde deshalb auch das Verhalten der Böschung grundlegend verändert. Nach Abschluss der Bohrarbeiten wurde eine beachtliche

Porenwasserdruckreduktion beobachtet. Das Ziehen der Verrohrung verursacht eine gewisse Volumenänderung im Boden mit gleichfalls einhergehender Porenwasserdruckreduktion. Auch wasserführende Kalksteinbänke, die von den Bohrungen durchfahren wurden, können jetzt entwässern.

Abbildung 7 zeigt im Zeitraum nach Ausführung der Bohrarbeiten bis Mitte Oktober 2002 eine bemerkenswerte Phase von tendenziell im Mittel abnehmendem Porenwasserdruck. Beginnend im November 2002 bis in das Frühjahr 2003 hinein wurde ein Anstieg der Porenwasserdrücke um durchschnittlich rund 5 kPa gemessen, was auf nasse Winterbedingungen hinweist. Für den Entwurf zukünftiger Sanierungsmaßnahmen ist es von Bedeutung, die jahreszeitlichen Schwankungsbereiche der Porenwasserdrücke auch nach der Sanierung hinreichend beurteilen zu können. Aus diesem Grund werden die Messungen fortgeführt. Vorläufig kann davon ausgegangen werden, dass der saisonal bedingte Anstieg im vorliegenden Fall höchstens 10 kPa beträgt. Für die Bemessung der Böschung wurde daher vorgeschlagen, den Porenwasserdruck im Bereich der Druckentlastungsbohrungen (auf der sicheren Seite liegend) mit einem Sicherheitszuschlag von 10 kPa (d. h. "Ansatzhöhe der Bohrungen plus 1,0 m WS") anzunehmen.

Im Gegensatz zu Abbildung 7 werden in Abbildung 8 die gemessenen Porenwasserdrücke in einem vertikalen Schnitt (Überlagerung der Schnitte A-A und B-B aus Abb. 4) dargestellt: Im Bereich der Druckentlastungsbohrungen (zwischen etwa NN+68 m und NN+75 m) wurde erwartungsgemäß ein relativ schneller Porenwasserdruckabbau gemessen (vgl. Abb. 7). Oberhalb der Druckentlastungsbohrungen (NN+75 m) tritt die Reduktion des ursprünglichen Porenwasserdrucks wie erwartet nur mit großer Verzögerung ein. Auf die globale Standsicherheit hat dies jedoch keine wesentlichen Auswirkungen.

2.2 Schlussbemerkungen und Ausblick

Das Dreiphasenmodell für den Boden unter Wasser wurde verwendet, um unter Annahme homogener Bodenverhältnisse instationäre Porenwasserdruckverteilungen abzuschätzen. Der vorhergesagte Porenwasserdruckabfall am Beispiel einer Einschnittsböschung wurde durch Feldmessungen bestätigt. Sowohl die Ergebnisse der numerischen Berechnungen als auch die Feldmessungen ermutigen zur Anwendung von Druckentlastungsbohrungen, auch in wenig durchlässigen Böden. Die Wirkung von in den Hang hinein geneigten Dräns wurde erläutert. Die angestrebte, möglichst direkt dränierende Wirkung in der potentiellen Scherzone wurde erreicht. Das Prinzip solcher Sicherungskonzepte kann zur Erhöhung der Standsicherheit eines Hanges, aber auch an hochwasserbelasteten Deichböschungen eingesetzt werden (Schulze et al. 2003 a, b, Köhler et al. 2006). Wie die in Abbildung 9 dargestellte Auswertung der über 12 Jahre durchgeführten Inklinometermessungen zeigt, wurde im vorliegenden Fall mit der Installation der Druckentlastungsbohrungen die Geschwindigkeit der Hangbewegung im langjährigen Mittel um mindestens 85 % vermindert.

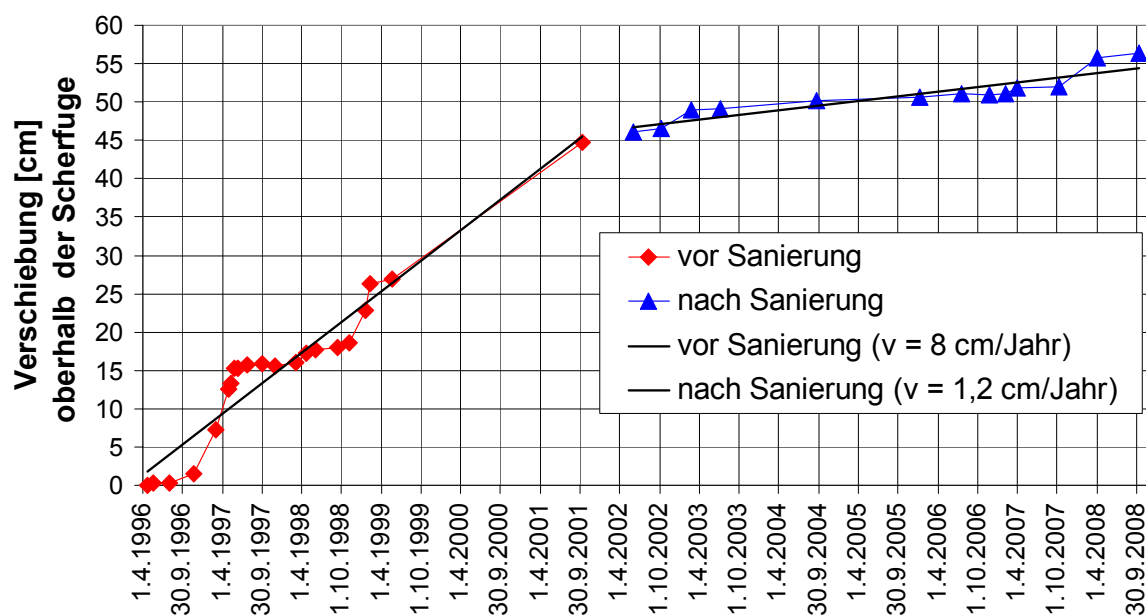


Abb. 9: Verschiebungen des Böschungsfußes bei SKH-km 3,55 (Ostufer) aus Inklinometermessungen vor und nach der Sanierung

Die Messungen werden im Rahmen der Beobachtungsmethode weitergeführt, um das Langzeitverhalten dieser Böschung weiterhin zu dokumentieren.

Für die praktische Anwendung der vorgeschlagenen Sicherungsmethode sind weitere technologische Entwicklungen erforderlich:

Dränrohre sind in gering durchlässigen, bindigen Böden nicht unbedingt notwendig, wenn die Bohrlöcher z. B. unmittelbar mit Sand gefüllt werden können. Vorteile bezüglich einer filterstabilen Dränwirkung sind in diesem Fall offensichtlich. Ständiges Ableiten von anfallendem Wasser aus den Dräns verbessert die Wirksamkeit der Maßnahme, erfordert jedoch erhöhten Wartungsaufwand und zusätzlich externe Energie. Der Einsatz von Vakuum führt zu einer weiteren Standsicherheitsverbesserung. Anfallendes Wasser muss aus den Dräns dauerhaft abgeleitet werden. Falls erforderlich, müssen auch Winterbedingungen berücksichtigt werden.

Wie das beschriebene Feldbeispiel gezeigt hat, ist die vorgestellte Methode in der Lage, Porenwasserdrücke in relativ kurzen Zeiträumen abzubauen und Hangbewegungen deutlich zu vermindern. Moderne Bohrverfahren erweitern den Einsatzbereich, indem z. B. auch gekrümmte Bohrungen hocheffektiv entlang von potentiellen Scherzonen ausgeführt werden können.

Vorhandene Trennflächen können im instationären Zustand zusätzliche Auswirkungen auf die Entwicklung von Porenwasserdruckverteilungen haben, die im Einklang mit den Erkenntnissen aus dem Dreiphasensystem stehen. In einer Tonlagerstätte wurden deshalb ab Mitte 2004 ergänzende Messungen mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluss von Trenn- und Bruchflächen auf die Porenwasserdruckentwicklung zu erfassen. Über Ergebnisse wird in einem zukünftigen Papier berichtet.

Die beschriebene Methode der Porenwasserdruckentlastung ist als effektive und oft auch ökonomische Maßnahme zur Böschungsstabilisierung zu empfehlen.

3 Literaturverzeichnis

Biot, M. E. (1941).

General Theory of Three-Dimensional Consolidation. Journal of Applied Physics, Vol. 12, Februar 1941, New York

EAU (2004).

Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen", E 115, 74 - 76, Berlin: Ernst & Sohn, ISBN 3-433-02852-4

GGU

FE Programm, Johann Buß, Braunschweig

Köhler, H.-J. 2001.

Dreiphasensystem Boden unter Wasser -..., Workshop teilgesättigte Böden, Schriftenreihe Geotechnik Nr. 6, 59 - 90, Bauhaus-Universität Weimar

Köhler, H.-J. 2003.

Transient excess pore water pressure causing structure deformation and hydraulic soil failure, Reconstruction of Historical Cities; Proc. Intern. Geot. Conf. Tercentenary of St. Petersburg, Ilichev et al. (eds), 2003. ASV Publ., St. Petersburg-Moskau, Vol. 1, 327 - 334, ISBN 5-93093-204-2

Köhler, H.-J. & Feddersen, I. 1991.

Porenwasserdruckmessungen in Böden, Mauerwerk und Beton. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, Nr. 68, 99 - 104, Eigenverlag

Köhler, H.-J., Feddersen, I. & Schwab, R. 1999a.

Soil and structure deformations due to reconstruction of an old lock built on unsaturated submerged clay, Proc. 2nd Intern. Sympos. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Turin; Jamiolkowski et al. (eds), 1999. Rotterdam: Balkema, 793 - 800, ISBN 9058090752

Köhler, H.-J., Schulze, R. & Feddersen, I. 1999b.

Influence of barometric pressure changes on slope stability. Proc. 5th Intern. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Singapur, 1999, 381 - 386. Rotterdam: Balkema.

Köhler, H.-J. & Schulze, R. 2000a.

Landslides Triggered in Clayey Soils – Geotechnical Measurements and Calculations. Bromhead et. al. (eds.), Proc. of 8th Intern. Symp. Landslides, Cardiff, 2000, 837 - 842. London: Th. Telford

Köhler, H.-J. & Schulze, R. 2000b.

Landslide triggering induced by barometric pressure changes,

Proc. GeoEng2000, Melbourne,

<http://public.hj-koehler.de/PapKoehlerSchulzMelbourne0555snes.pdf>

- Köhler, H.-J., Schulze, R. & Asami, K. 2002.
Protection measures in order to increase safety of unstable clay slopes by unconventional pore pressure release techniques. Rybář et al. (eds.), Landslides - Proc. 1st Europ. Conference Landslides, Prag, 2002, 597 - 601. Lisse: Balkema.
- Köhler, H.-J. & Schulze, R. 2006.
Sicherung instabiler Einschnitts- und Deichböschungen mittels Druckentlastungsbohrungen. Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, Vol. 2, 2006, 305 - 324, Eigenverlag Universität Siegen
- Montenegro, H., Köhler H.-J. & Holfelder T. 2003.
Inspection of excess pressure propagation in the zone of gas entrapment below the capillary fringe. Schanz (ed.), Unsaturated Soils: Numerical and Theoretical Approaches, 159 - 172. Berlin: Springer.
- Schulze, R. & Köhler, H.-J. 1999.
Landslides in overconsolidated clay – geotechnical measurements and calculations. Barends et al. (eds.), Proc. 12th Europ. Conf. Soil Mech., Amsterdam, 1999, 601 - 608. Rotterdam: Balkema.
- Schulze R. & Köhler, H.-J. 2003a.
Stabilisation of endangered clay slopes by unconventional pore pressure release technique, Proc. 6th Intl. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Oslo, 2003, Myrvoll (ed.), 347 - 353, Balkema, Lisse
- Schulze, R. & Köhler, H.-J. 2003b.
Increasing safety of unstable slopes by unconventional pore pressure release technique. Proc. 1st GeoTech. Measurements and Modelling (GTMM), Karlsruhe, 2003, 245 - 251, Lisse: Swets & Zeitlinger, ISBN 9058096033
- Schwab, R., Köhler, H.-J. & Schulze, R. 2004.
Pore water compressibility and soil behaviour – excavations, slopes and draining effects. Proc. Skempton Conference, 2004, 1169 - 1182, London, Th. Telford, ISBN 0 7277 3264 1
- Terzaghi, K. & Peck, R. 1948.
Soil Mechanics in Engineering Practice, New York: Wiley
- Vulliet et al. 2002.
Ungesättigte Bodenmechanik und ihre Anwendung auf Hangbewegungen. BAW-Kolloquium: Der Einfluss von Lufteinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, 2002, Karlsruhe
<http://www.baw.de/downloads/veranst/vortraege/vulliet.zip>

