

Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	5 (1998), 1	S. 37 – 42	6 Abb., 6 Lit.
----------------------------------	--------------	-------------	------------	----------------

Demonstration einer Standsicherheitsuntersuchung am Oderdeich, Abschnitt „Hohenwutzen“, km 70,4–70,5

NORBERT EHLE & SIEGRID EICHHORN

1. Einleitung

Während der Hochwasserereignisse im Juli/August 1997 an der Oder bestand eine Hauptsorge in der abnehmenden Standsicherheit der Deiche durch die langandauernde Durchfeuchtung. Für die Gesellschaft für bohrlochgeophysikalische und geoökologische Messungen (BLM Storkow) und die FUGRO CONSULT GmbH war das Veranlassung, ein effektives und zuverlässiges Verfahren zur Bestimmung der Dichte und Durchfeuchtung des Deichkörpers anzubieten, das beide Gesellschaften gemeinsam bei der Standsicherheitsuntersuchung von Braunkohlekippen erfolgreich eingesetzt hatten. Bei diesem Verfahren handelt es sich um die Kombination der Drucksondierung mit der radiometrischen Bohrlochmessung. Im Gegensatz zur traditionellen Bohrlochgeophysik wird nicht in einem verrohrten Bohrloch gemessen, sondern das Sondiercasing der Drucksonde wird direkt als Meßrohr hydraulisch in den Boden gepreßt. Im Meßrohr werden Gamma-, Gamma-Gamma- und Neutron-Neutron-Messungen mit einer kleinkalibrigen Meßsonde durchgeführt, auf deren Grundlage eine quantitative Bewertung des Tonmineralanteils, der Rohdichte und des Feuchtegehaltes möglich ist. Der Vorteil der Kombination Drucksondierung und Bohrlochgeophysik besteht darin, daß einerseits keine Beeinflussung des umgebenden Gesteins durch Bohrprozeß oder Bohrmedien erfolgt und andererseits das Risiko eines Quellenverlustes beim Direkteinsatz einer speziellen radioaktiven Drucksondierspitze vermieden wird.

Mit dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg MUNR, Abteilung Wasserwirtschaft, wurde eine Demonstrationsuntersuchung mit dem vorgeschlagenen Verfahren zur Deichstandsicherheitsbewertung am Abschnitt Hohenwutzen vereinbart. Bei der Besprechung vor Ort stellte es sich heraus, daß für die Lösung der unmittelbar anstehenden Aufgaben bei der Bewältigung der Hochwasserfolgen nicht so sehr eine Bewertung des Durchfeuchtungsgrades des Deichkörpers im Sinne einer linearen Untersuchung zur Ausgliederung von Schwachstellen gefragt war, sondern die Ermittlung der Ursachen des Versagens der Schutzbauwerke an den bekannten Schwachstellen wie Hohenwutzen, Zollbrücke oder Reitwein mit Hinweisen für deren Sanierung.

Wir haben deshalb mit den Verantwortlichen des MUNR vor Ort ein komplexes geotechnisches Untersuchungsprogramm für diese Aufgabenstellung an einem Querprofil des Deiches abgestimmt, das hier als Fallbeispiel vorgestellt werden soll.

2. Durchgeführte Untersuchungen

2.1. Geländearbeiten

Auf dem Deichabschnitt „Hohenwutzen“, km 70,4-70,5, wurden am 21.08.97 an einem ausgewählten Ost-West-Profil des Deiches folgende Untersuchungen durchgeführt: **Elektrische Drucksondierungen (CPT)** mit FUGRO-Standardsonde (Abb. 1)

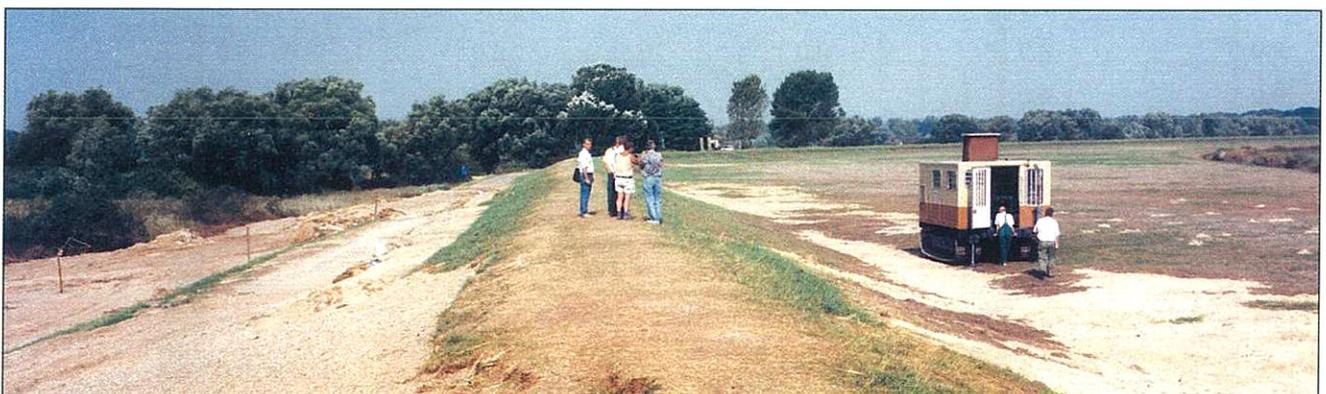


Abb. 1

FUGRO-Drucksonde bei der Geländeuntersuchung am Deichabschnitt Hohenwutzen, Foto: N. Ehle

Es wurden vier Drucksondierungen (DS), DS 1 bis DS 4, bis jeweils 15 m abgeteuft, davon zwei DS landseitig und zwei DS flußseitig. Auf der Dammkrone konnte aus Sicherheitsgründen keine DS angesetzt werden. In den Sondierungen wurden Spitzendruck, Mantelreibung und Porenwasserdruck gemessen und als kontinuierliches Profil mit 2 cm Tiefenauflösung dargestellt. Für geophysikalische Bohrlochmessungen wurden an den Ansatzpunkten DS 1 und DS 3 ND 56 mm, Casing, ebenfalls bis 15 m, eingepreßt.

Geophysikalische Bohrlochmessungen

In den Sondierungen DS 1 und DS 3 wurden durch die BLM GmbH, Storkow, geophysikalische Bohrlochmessungen (Gamma-, Gamma-Gamma- und Neutron-Neutron) durchgeführt. Um den Einfluß der Stahlverrohrung zu berücksichtigen, erfolgte in Vorbereitung des bohrlochgeophysikalischen Meßeinsatzes eine Kalibrierung der eingesetzten Sonden in Modellen innerhalb der beim Feldeinsatz verwendeten Drucksondiercasings.

Rammkern- und Rammsondierung

Zur Vervollständigung der geologisch-geotechnischen Informationen auf dem gewählten Profilschnitt wurden auf der Dammkrone jeweils eine handgeführte Rammkernsondierung (RKS), DN 50 mm, bis 8,0 m und eine leichte Rammsondierung DPL 10 (LRS) bis 6,0 m unter Ansatzpunkt durchgeführt, da der Zustand des Deiches den Einsatz der schweren Drucksonde in diesem Bereich nicht erlaubte.

Aus der RKS wurden bei der geologischen Aufnahme gezielt Bodenproben zur bodenmechanischen Charakterisierung und laborativen Analyse des Bodens entnommen. Die Entnahme erfolgte aus den für die Standsicherheitsuntersuchungen relevanten Schichten als Mischproben.

2.2. Laboruntersuchungen

Die Proben aus der RKS sind zur Beschreibung und zur bautechnischen Klassifizierung der anstehenden Gesteine nach DIN 18196 und zur Bestimmung bodenmechanischer Kennwerte im Baugrundlabor auf Korngrößenverteilung, natürlichen Wassergehalt und Konsistenzgrenzen untersucht worden.

2.3. Auswertarbeiten

Die Auswertung der geotechnischen und bohrlochgeophysikalischen in-situ-Meßergebnisse basiert auf einschlägigen DIN-Vorschriften und den betriebsinternen Unterlagen und Erfahrungen der FUGRO CONSULT GmbH sowie der BLM GmbH Storkow.

Die Auswertung der Drucksondiererergebnisse - kontinuierliche Meßwerte von Spitzendruck (q_c), Mantelreibung (f_c) und Porenwasserdruck (P_p) in MN/m² mit einer Auflösung von 2 cm (Abb. 2) erfolgt in mehreren Arbeitsschritten : Das **Reibungsverhältnis** $R_f = f_c / q_c \times 100\%$ wird durch das Drucksondierprogramm automatisch bestimmt und graphisch dargestellt. Das Reibungsverhältnis R_f bildet die Grundlage für die lithologische Interpretation bei der Bestimmung der Bodenarten.

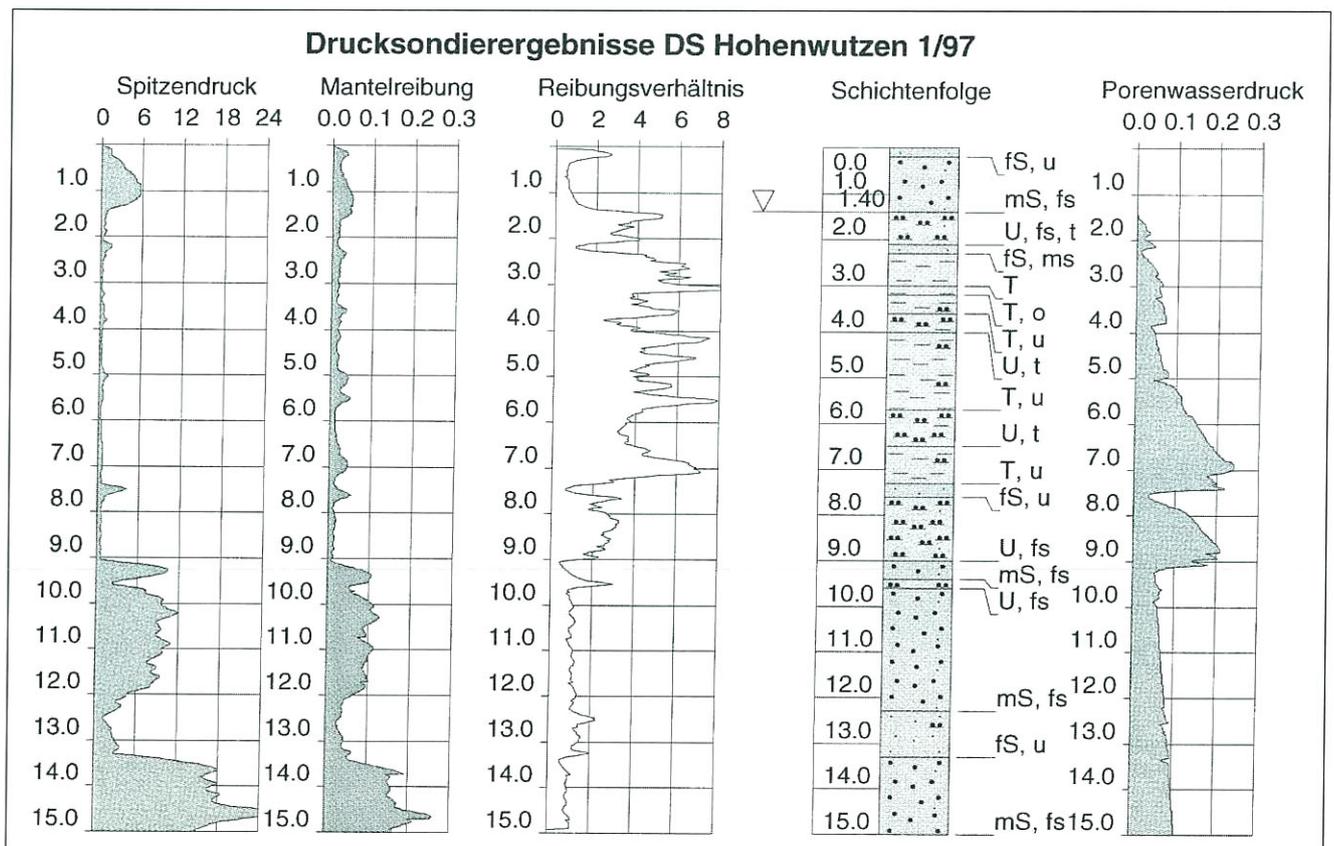


Abb. 2 Darstellung der Ergebnisse der elektrischen Drucksondierung und ihre lithologische Interpretation

Die **Bodenarten** werden in Anlehnung an die von CAMPANELLA & ROBERTSON (1982) ermittelte Gesetzmäßigkeit, daß für jede Bodenart ein bestimmtes Reibungsverhältnis charakteristisch ist, bestimmt. Ganz verallgemeinernd: R_f bis 2 % charakterisieren Sande, bis 4 % Schluffe, bis 8 % Tone und höhere Werte organische Ablagerungen. Diese allgemeinste Untergliederung kann in Kenntnis regionaler Besonderheiten detaillierter ausgearbeitet werden. Wir verzichten deshalb auf eine oftmals als Softwarelösung angebotene automatische Interpretation und ziehen eine ingenieurmäßige Bearbeitung vor - durch Interpretation der Graphik R_f wird die Schichtenfolge analog einem Bohrstäbchen dargestellt (Abb. 2), wobei ergänzende Informationen zum Standort, regionale Besonderheiten und nationale Standards berücksichtigt werden.

Der **Grundwasserspiegel** kann für alle durchteuften Schichten durch Auswertung der Porenwasserdruckmeßwerte bestimmt werden (Abb. 2).

Die **Auswertung der bohrlochgeophysikalischen Messungen**, der Gamma-, Gamma-Gamma- und Neutron-Neutron-Meßkurven, gestattet eine quantitative Bewertung der natürlichen Rohdichte, der Porosität, des Wassergehaltes und des Gehalts an bindigen Bestandteilen. Die Ergebnisse werden anschaulich in einer Gesteinsgraphik dargestellt, die teufenbezogen die prozentualen Anteile wassergesättigten Porenvolumens, organischer, rolliger und bindiger Bestandteile ausweist (Abb. 3, siehe Einlegeblatt). Neben der Präzisierung des geologischen Modells aus den Drucksondierergebnissen können hier auch absolute Werte, z. B. der Rohdichte oder des Wassergehaltes, schichtbezogen abgeleitet werden.

Die **Zustandsformen der Bodenarten** werden von den bei der Drucksondierung ermittelten absoluten Werten des Spitzendruckes (q_c), der die Bruchfestigkeit der einzelnen Schichten charakterisiert, abgeleitet. Beziehungen zwischen Spitzendruck und Zustandsformen sind für alle wichtigen Bodenarten von verschiedenen Autoren (z. B. PLACZEK 1985) untersucht und in Anlehnung an DIN 4094 zusammengefaßt worden.

Die **Rechenwerte** für die Parameter Wichte, Reibungswinkel und Kohäsion zur Standsicherheitsberechnung lassen sich entweder aus Bodenart und Zustandsform nach DIN 1055, Teil 2, Tab. 1 und 2 zuordnen, aus den bei der Drucksondierung ermittelten absoluten Werten des Spitzendruckes (q_c) bestimmen oder können, wie die Wichte, aus den bohrlochgeophysikalischen Messergebnissen übernommen werden.

3. Geologisches Modell

Aus den durchgeführten Arbeiten wurden ein geologisches Modell des Standortes und ein geologisch-geotechnischer Modellansatz entwickelt.

Aus naturräumlicher und geologischer Sicht befindet sich Hohenwutzen auf der Struktur der „Neuenhagener Insel“ im Oderbruch. Diese Struktur besteht aus jungpleistozänen mittel- bis grobkörnigen Talsanden (bis maximal 35 m Mächtigkeit), die flächendeckend von mit organischen Resten durch-

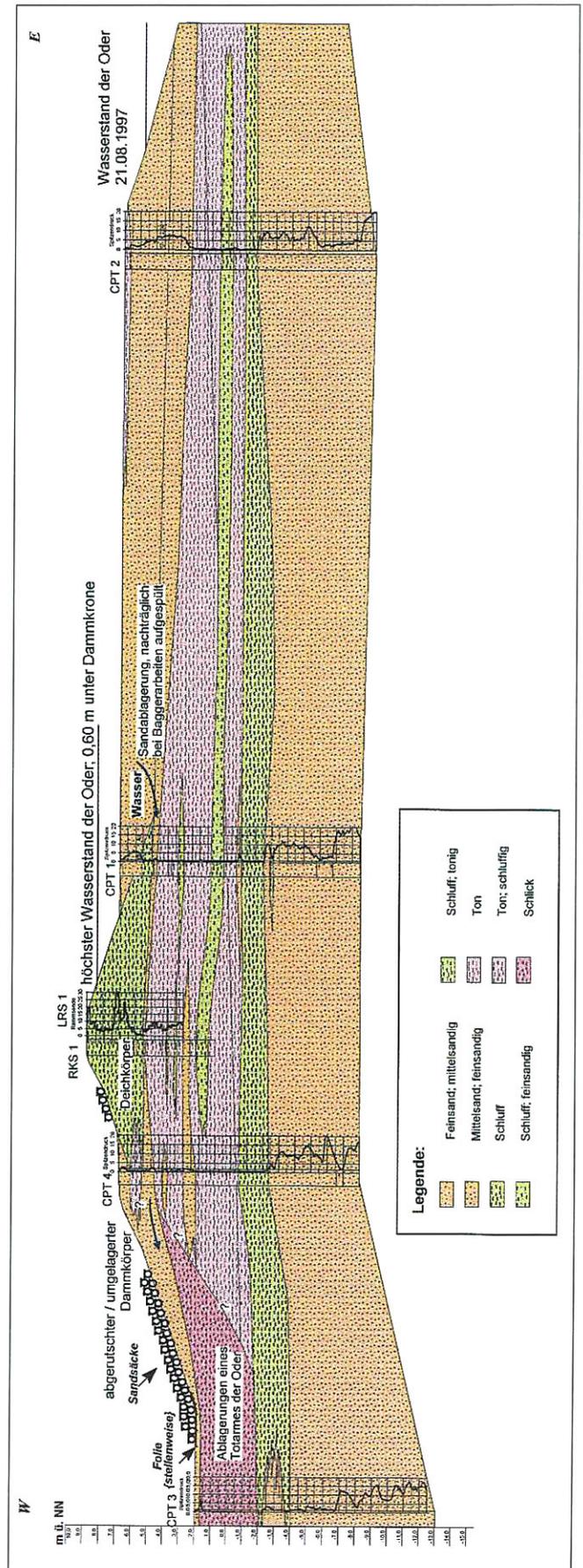


Abb. 4
Geologischer Schnitt am Deichabschnitt Hohenwutzen

setzten holozänen Schluffen und Tonen, dem sogenannten Oderschlick, überlagert werden. Die Mächtigkeit dieser Ablagerung beträgt im Mittel zwischen 2-5 m. In Bereichen relikter Flußarme und Seen wurden die tonigen Schlicke durch Tone mit einem höheren Organikanteil (z. T. auch torfhaltig) ersetzt.

Die ermittelten in-situ-Meßergebnisse und Aufschlüsse bestätigen und präzisieren die beschriebenen regionalen Verhältnisse und gestatten die Konstruktion eines detaillierten geologischen Schnittes (Abb. 4). Danach wird der gesamte zentrale und östliche Dammschnitt von den beschriebenen holozänen Ton- und Schluffschichten unterlagert (Bodengruppe nach DIN 18196 „Schluff-mittelpastisch“, UM). Der hohe Organikanteil wird durch stark erhöhte Reibungsverhältnis-

auf tretende, wasserdurchlässige Sandschicht eingelagert, deren Entstehung nicht geogenen Ursprungs zu sein scheint. Daß diese Schicht hydraulisch grundwasserleitend wirkt, wurde durch entsprechende Beobachtungen des Deichpersonals während des Hochwassers bestätigt. Es ist anzunehmen, daß es sich hier um eine den Deichfuß stabilisierende „Tragschicht“ handelt. Diese Sandschicht kommuniziert mit einer ca. 2 m mächtigen sandigen Aufspülung oderseitig.

Ebenso deutet die sich anschließende Tonschichtoberkante auf eine geringe anthropogene Formgestaltung hin. So erreicht die Oberfläche der Tonschicht mit ca. 5 m NN genau unterhalb der Dammkrone ihre höchste Lage, die hier mit ca. 0,5 m das Odernormalwasser überragt.

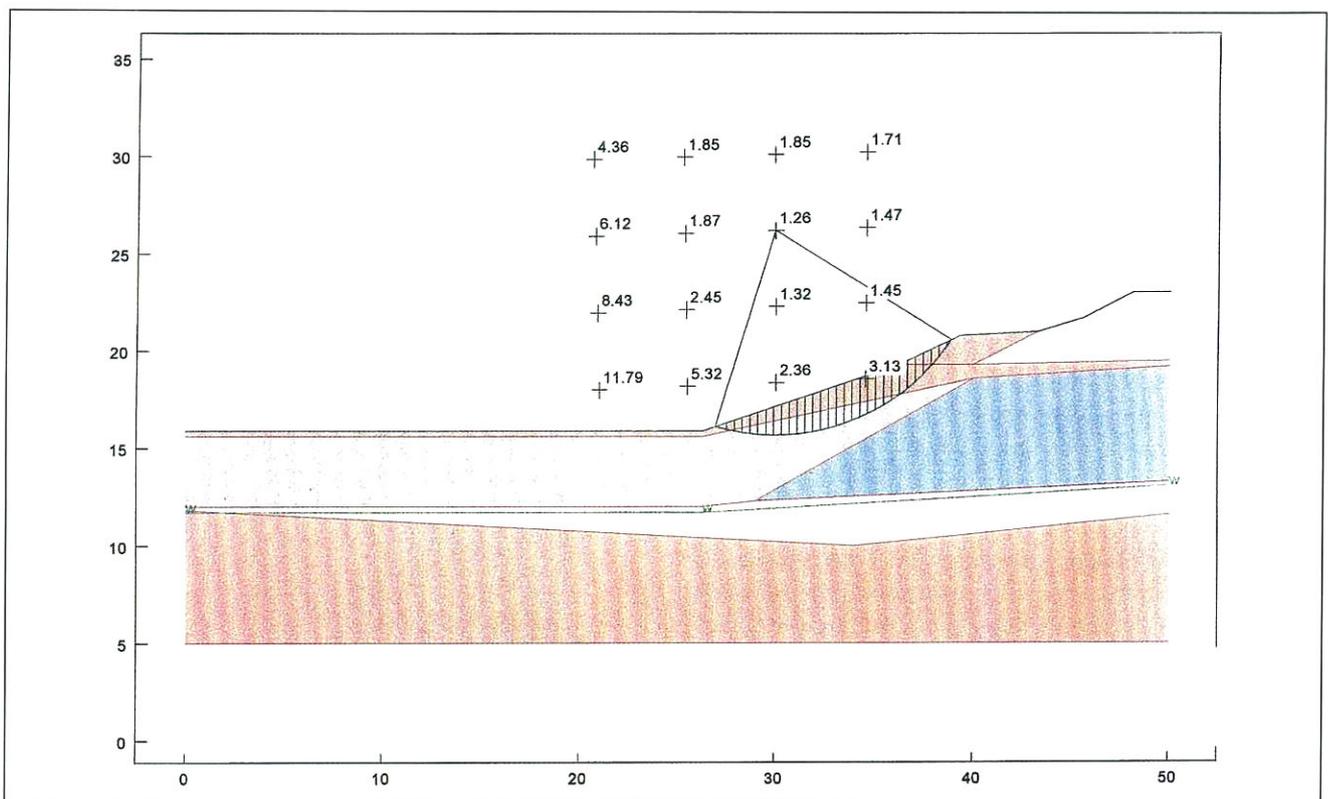


Abb. 5
Böschungbruchberechnung - Normalzustand

se der Drucksondierung beschrieben, die gut mit den hohen Porositäten der Bohrlochgeophysik korrelieren (Maximalporositäten zwischen 60-70 %).

Im Bereich des westlichen Dammhanges wird der Ton durch noch stärker organisches Material enthaltende Schlick-Torf-Ablagerungen ersetzt, während die tieferliegende Schluffschicht ausdünn. Der Torfanteil läßt sich aus einem Reibungsverhältnis > 10 bei extrem niedrigem Spitzendruck ableiten.

Zwischen der unterlagernden geogenen Tonschicht und dem aus mittelpastischen Schluff bestehenden Deichkörper ist eine geringmächtige (nur wenige Dezimeter mächtige) jedoch flächig aushaltende, sowohl in DS 1 als auch in DS 4

4. Standsicherheitsberechnung

4.1. Geologisch-geotechnischer Modellansatz

Unter Verwendung der am Standort aufgeschlossenen geologischen Verhältnisse sowie der interpretierten Meßergebnisse geht folgender Modellansatz in die Standsicherheitsberechnung ein:

Variante a) „Normalfall“

Bindiger nicht wasserdurchlässiger Dammkörper (steife Konsistenz), mit horizontalem Dammfuß.

Geringmächtige wasserdurchlässige Sandschicht unterhalb des Dammkörpers, bei Oderwassernormalhöhe kein Wasserabfluß durch Sandschicht.

Unterlagernde Tonschicht im Osten (steife Konsistenz), unterlagernde Schlick-Torfschicht im Westen (weiche Konsistenz).

Im Liegenden Anschluß der gespannten Grundwasser führenden Talsande.

Kein zusätzlicher hydrostatischer Druck auf den Deich.

Da die „normalen“ Grundwasserstände am Standort nicht dokumentiert sind, erfolgte die Böschungsbruchberechnung für zwei unterschiedliche Porenwasserdruckzustände, die unterschiedlichen Wassersättigungsgraden entsprechen.

Variante b) „Extremhochwasser“

(abklingendes Extremhochwasser entspricht dem Untersuchungs-Ist-Zustand)

Bindiger nicht wasserdurchlässiger Dammkörper (weiche-steife Konsistenz) mit horizontalen Dammfuß.

Geringmächtige wasserdurchlässige Sandschicht unterhalb des Dammkörpers, bei Wasserständen > 5 m NN erfolgt ein Wasserabfluß durch die Sandschicht landeinwärts.

Infolge Wassereinspeisung Verringerung der Konsistenzen in der unterlagernden Tonschicht im Osten auf weich sowie in den unterlagernden Schlick-Torfschichten im Westen auf breiig bis weich (Spitzendruck z. Z. = 0 MN/m²!).

Im Liegenden Anschluß der gespannten Grundwasser führenden Talsande.

Wegen des Aufstaus des Oderwassers auf 0,6 m unter Deichkrone wirkt zusätzlicher hydrostatischer Druck auf den Deich.

4.2. Ergebnis der Standsicherheitsberechnungen

Die Berechnung erfolgte mit Hilfe der GGU-Programm-Software „BOESCH-KR“ als Böschungsbruchberechnung für kreisförmige Gleitflächen. Die Bewertung wurde nach der DIN 4084 (alt), die die größte Sicherheit S zu Grunde legt, vorgenommen.

Als Variablen wurden die in-situ aus Drucksondierergebnissen (und für den Deichkörper laborativ aus RKS-Proben) bestimmten Bodengruppen und Konsistenzen bzw. Lagerungsdichten mit den Parametern Dichte (γ), innere Reibung (ϕ) und Kohäsion (c) sowie die jeweilige Wassersättigung zugeordnet.

Die ermittelten Böschungssicherheiten S für den „Normalfall“ bewegen sich in Abhängigkeit vom angenommenen Grundwasserstand mit Werten zwischen 1,26 und 1,13 um die nach DIN 4084 vorgegebenen Mindestsicherheit von 1,2 (Abb. 5).

Aus diesem Ergebnis ist abzuleiten, daß der untersuchte Deichabschnitt nur im Trockenzustand die geforderte Mindestsicherheit aufweist und sich bereits bei saisonal bedingt auftretenden „Normalhochwassern“ in einem kritischen Sicherheitszustand befinden kann.

Das Berechnungsergebnis für das „Extremhochwasser“ weist mit $S = 0,76$ einen höchst instabilen Zustand nach, der zwangsläufig zum Böschungsbruch führen mußte (Abb. 6).

5. Schlußfolgerungen

Durch die Untersuchung des Deichstandortes mit Drucksondieretechnik und bohrlochgeophysikalischer Messung konnten in-situ schnell und wirtschaftlich alle Angaben gewon-

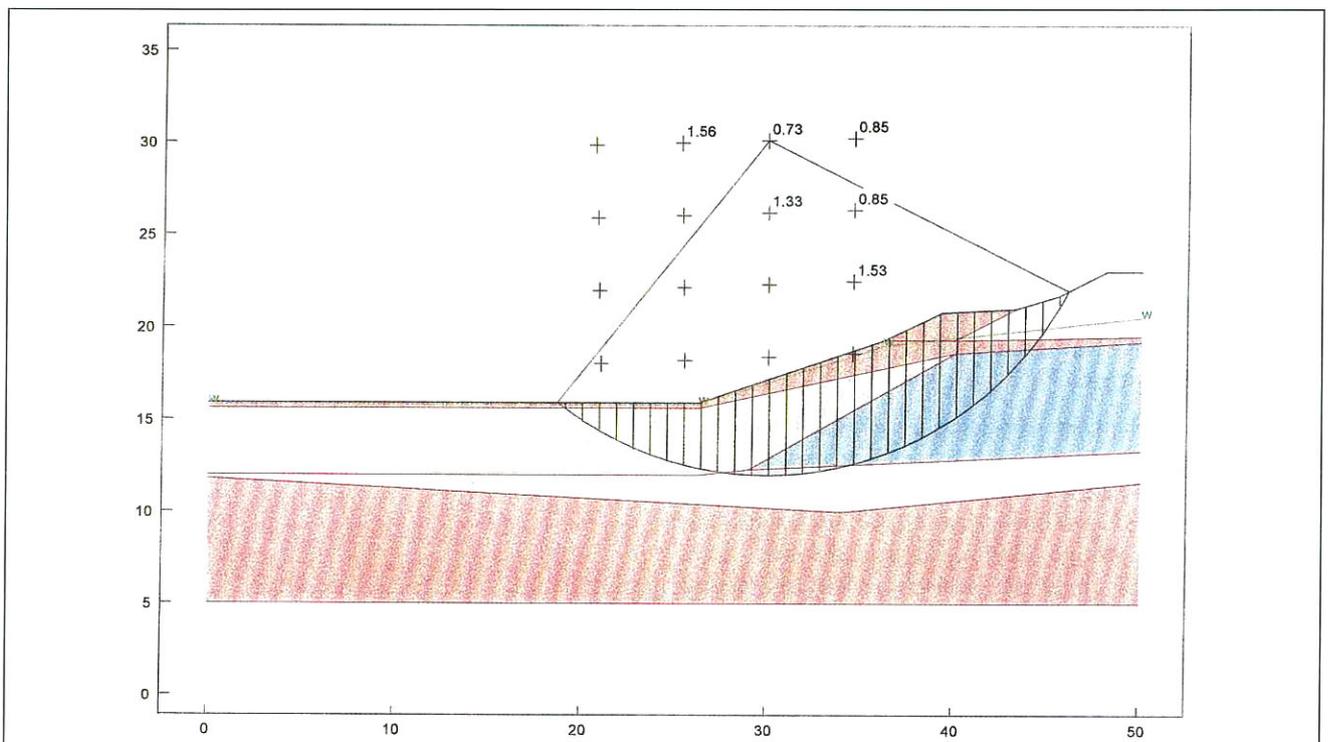


Abb. 6
Böschungsbruchberechnung - Extremhochwasser 1997

nen werden, um das geologische Modell des Standortes einschließlich seines tieferen Untergrundes (Bodenarten im Profil, Grundwasserstand), die Zustandsformen der Bodenarten und die Rechenwerte für die Ermittlung der Standsicherheit (Wichte, Innere Reibung, Kohäsion) zu bestimmen.

Als Ursache für den instabilen Zustand des Abschnittes bei Hochwasser sind Schlickablagerungen eines alten Oderarmes, die bis unter die landseitige Deichböschung reichen, sowie eine wasserleitende Schicht unter der Deichbasis festgestellt worden.

Die Ergebnisse der Standsicherheitsbewertung verdeutlichen die Bedeutung, die der genauen Kenntnis des geologischen Untergrundes für die Errichtung standsicherer Schutzanlagen zukommt.

6. Zusammenfassung

FUGRO CONSULT GmbH hat gemeinsam mit der Gesellschaft für bohrlochgeophysikalische und geoökologische Messungen (BLM Storkow) am Oderabschnitt Hohenwutzen im Rahmen einer technischen Demonstration die Einsatzmöglichkeiten der Drucksondiertechnologie für die Bewertung der Deichstandsicherheit vorgestellt. In einem Deichquerprofil wurden vier Drucksondierungen bis 15 m unter Gelände durchgeführt und dabei kontinuierlich Spitzendruck, lokale Mantelreibung und Porenwasserdruck gemessen. An zwei Ansatzpunkten wurden anschließend mit der Drucksonde Meßrohre bis ebenfalls 15 m in den Untergrund gepreßt, in denen bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt wurden. Im Bereich der Deichkrone wurden ergänzend herkömmliche Untersuchungen mit leichtem Gerät durchgeführt (Rammkernsondierung mit Probenahme und bodenmechanischer Laboranalyse, leichte Rammsondierung), da der Deichkörper mit schwerem Gerät noch nicht befahrbar war.

Aus den Meßwerten der Drucksondierungen lassen sich der lithologische Schichtenaufbau (geologisches Modell, Bodenarten), Lagerungsdichte und Konsistenz (Zustandsformen) nach DIN 4094, sowie Wichte, Reibungswinkel und Kohäsion (Rechenwerte) nach DIN 1055 ableiten. Die geophysikalischen Bohrlochmeßkurven ermöglichen eine lückenlose quantitative Bewertung der Rohdichte und des wassererfüllten Porenraumes.

Eine Standsicherheitsberechnung nach dem Lamellenverfahren (Bishop) für den Zustand Extremhochwasser ergibt eine Böschungssicherheit von $S = 0,76$ und erklärt den Böschungsbruch. Als Ursache für den instabilen Zustand sind mehrere Meter mächtige Schlickablagerungen eines alten Oderarmes, die bis unter die landseitige Deichböschung reichen, sowie eine wasserleitende Schicht unter der Deichbasis anzusehen.

Literatur

CAMPANELLA, R. & P. ROBERTSON (1982): State-of-the-art in-situ testing of soils: Developments since 1978. - Dept. of Civil Eng., University of British Columbia, Vancouver, Canada.

BOESCH-KR (1997): Böschungsbruchberechnung für kreisförmige Gleitflächen (Bishop). - Berechnungssoftware der GGU Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH, Braunschweig 1997.

PLACZEK, D. (1985): Vergleichende Untersuchungen beim Einsatz statischer und dynamischer Sonden. Geotechnik 8, 68-75, Essen (DGEG).

DIN 1055, Teil 2 (1976): Lastannahmen für Bauten; Bodenkenngrößen, Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel.

DIN 4084 (1981): Gelände- und Böschungsbruchberechnungen.

DIN 18169 (1988): Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Geol. Norbert Ehle
Dipl.-Ing. Geotechn. Siegrid Eichhorn
FUGRO CONSULT GmbH
Wolfener Straße 36 K
12681 Berlin