

Probabilistische Überlegungen bei der Durchströmung von Deichen

Kurzfassung

Bei Deichen und Grundwasserleitern, deren innerer Aufbau punktweise erkundet wurde, können sich Unsicherheiten bei der Bestimmung der Bodenkennwerte ergeben. Durch Anwendung eines statistischen Modells wird versucht, die Information über die Strömungsverhältnisse und die Standsicherheit an Deichen zu erweitern.

Probabilistic aspects of the seepage flow in dikes

Abstract

In dikes and aquifers where the internal soil composition is not completely known uncertainties can arise when determining the soil properties. By means of a statistical model an attempt is made to find more evident and comprehensive results concerning the flow pattern and the stability of the dikes.

1 Gegenwärtig meist übliche Bemessung

Die nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) durchzuführenden Bemessungen im Wasserbau und in anderen Bauingenieurdisziplinen sehen meist eine Bemessung in bestimmten Lastfällen vor, von denen man annimmt, daß sie den maßgebenden Fall repräsentieren (Bild 1).

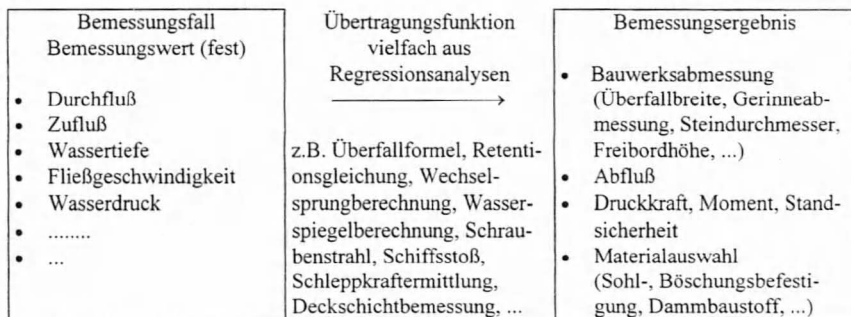


Bild 1: Gegenwärtig meist übliche Bemessungspraxis im Wasserbau

Verschiedene Arten von Unsicherheiten erschweren aber die Entscheidung für den „maßgebenden“ Lastfall. Im Wasserbau muß mit den folgenden Unsicherheiten gerechnet werden: Die **Naturunsicherheit** resultiert aus der Zufälligkeit von meteorologischen und hydrologischen Abläufen und stellt das größte, objektiv nicht zu beseitigende Problem dar. Eventuelle Meß- oder Übertragungsfehler können zu einer **Datenunsicherheit** führen. Für Bemessungszwecke wird die Realität modelliert. Weil vielfach keine vollständige Übertragbarkeit möglich ist, die hydraulischen Modellgesetze nicht gleichzeitig erfüllbar sind (Froude, Reynolds) und für die Formulierung von mathematischen Zusammenhängen vielfach Approximationsfunktionen verwendet wurden, ist mit einer **Modellunsicherheit** zu rechnen. Die **Parameterunsicherheit** resultiert daraus daß möglicherweise nicht alle Abhängigkeiten oder Parameter bekannt oder bestimmbar sind. Selbst wenn diese in die Bemessung eingehenden Unsicherheiten nicht vorhanden wären, können während der Nutzungsdauer des Bauwerkes **Betriebsunsicherheiten** (Bedienfehler, Manövrierfehler, Bedarfsschwankung, Versagen von Bauteilen) auftreten.

2 Vorschlag für die Bemessung auf probabilistischer Grundlage

Die genannten Unsicherheiten führen dazu, daß sich eindeutige Lastfälle miteinander nicht formulieren lassen. In solchen Fällen hilft sich der Ingenieur gelegentlich damit, obere und untere Grenzfälle (auf der „sicheren“ und „unsicheren“ Seite) abzuschätzen. Aber auch diese Erweiterung der Bemessung gibt nur einen punktuellen Einblick in die möglichen Belastungssituationen.

Es wäre vorteilhaft, die Bemessung nicht nur mit zwei Werten, sondern mit einer großen Anzahl von Werten durchzuführen, deren Häufigkeit des Auftretens der in der Realität beobachteten Verteilung entspricht. Wenn es sich um fehlerbehaftete Meßwerte handelt, könnten diese z. B. normalverteilt um einen Erwartungswert streuen. Wenn es sich um natürliche Einflußgrößen (Hochwasser, Wind) handelt, kommen u.a. die Gumbelverteilung, die Pearson(III)Verteilung oder die Normalverteilung der Logarithmen in Frage.

Wenn es gelingt, eine zufällige Belastungsgröße (Merkmal der Verteilung) einem zufälligen Widerstand gegenüber zu stellen, ist unter bestimmten Voraussetzungen eine geschlossene (exakte) mathematische Lösung des sogenannten Faltungsintegrals möglich [3], [5]. Beim Vorliegen mehrerer zufälliger Eingangsgrößen steigt der mathematische Aufwand stark an. Eine geschlossene Lösung ist dann oft nicht mehr oder nur mit starken Vereinfachungen angebar. In diesen Fällen läßt sich die Verteilungsfunktion der gesuchten Ergebnisgröße nur mit Hilfe statistischer Versuche (Monte Carlo Methode) ermitteln [6].

Es läßt sich der folgende Vorschlag für die Bemessung formulieren (Bild 2):

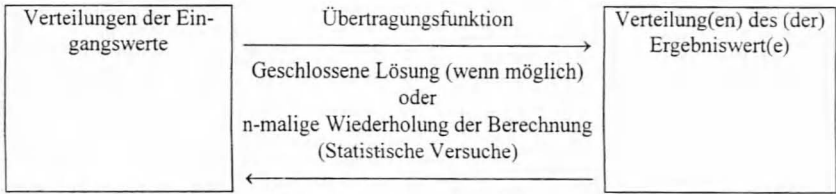


Bild 2: Vorschlag für Bemessung im Wasserbau

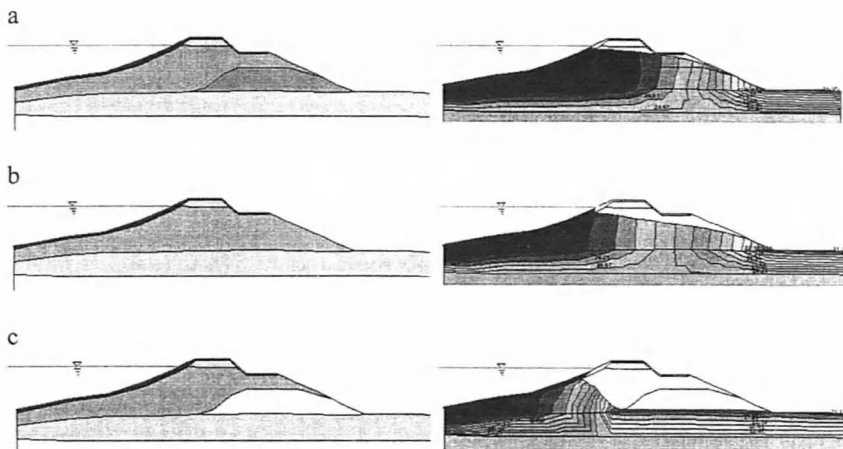
3 Situation bei der hydraulischen und statischen Bemessung von Deichen

Während beim Neubau von Deichen die verwendeten Erdstoffe hinsichtlich ihrer hydraulischen und bodenmechanischen Eigenschaften gut bekannt sind und durch entsprechende Einbauvorschriften auch innerhalb einer geringen Streuung gehalten werden können, sind bei historisch gewachsenen und nur stellenweise erkundeten Deichen die Bodeneigenschaften meist nur unvollständig bekannt. Zwischen den Aufschlüssen muß interpoliert werden. Beprobungsergebnisse unterliegen einer Streuung, zumal eine ungestörte Entnahme der Proben nur schwer möglich ist.

Starke Inhomogenitäten und wechselnde Bodenschichten sind z.B. auch in den historisch entstandenen und mehrmals erhöhten brandenburgischen Deichen an der Oder anzutreffen. Benachbarte Böden weisen z.T. erheblich voneinander abweichende Durchlässigkeiten auf.

Dem Bild 3 liegt ein Deichquerschnitt bei Reitwein (km 5,1) zugrunde. Deutlich zu erkennen ist der Schluffkörper auf der Luftseite, der sehr wahrscheinlich dem ursprünglichen, später mit schluffigem Sand erhöhten Deich entspricht.

Durch Berechnung der Durchströmung (als vertikal ebenes Problem) wurde festgestellt, daß die Sickerlinie infolge starker Inhomogenitäten im Deichkörper und im Untergrund deutlich von der Sickerlinie in einem homogenen Damm gleicher Geometrie abweicht. Da die Deiche nicht über Sickerprismen verfügen, tritt die Sickerlinie häufig auf der Luftseite der Deiche, mitunter schon auf der Berme aus, was zu (rückschreitender) Erosion führen kann. Wenn der ursprüngliche Deich weniger durchlässig als die Übersüttung ist, kommt es zu einer Anhebung der gesättigten Zone (Bild 3a). Im Fall des Bildes 3c wirkt der durchlässigere alte Deich wie ein Drainageprisma.



Boden	k_f (m/s)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	c (kN/m ²)
OH	10^{-7}	11	1	1
SU	$5 \cdot 10^{-6}$	19	10	1
SU*	10^{-6}	20	10	3
TL	10^{-9}	19	9	3
UM	10^{-8}	18,5	8,5	4
SE	$4 \cdot 10^{-4}$	19	10	-

Bild 3: Deichquerschnitt (ähnlich dem Oderdeich bei Reitwein, km 5,1)
 a: erkundeter, vereinfachter Querschnitt, alter Deich dichter als Überschüttung
 b: ohne überschütteten Deich, c: überschütteter Deich mit größerer Durchlässigkeit, Wirkung als Drainage

Eine solche Abweichung des Strömungsbildes von dem im homogenen Damm ist auch an vielen anderen Deichquerschnitten der Region festgestellt worden. Wenn geringdurchlässige Schichten die Luftseite von Deichen oder Dämmen abdecken, kommt es zu einem Aufstau der Sickerlinie, der beispielsweise am Kanaldamm des Oder-Spree-Kanals bei Eisenhüttenstadt während des Oderhochwassers 1997 in Form von Durchfeuchtungen und gespanntem Wasser unter der Deckschicht auch beobachtet werden konnte. Bei geringdurchlässigen Schichten auf der Wasserseite kann eine Absenkung der Sickerlinie erfolgen, wobei jedoch weiterhin eine Wasserbewegung im ungesättigten Bereich oberhalb der Sickerlinie stattfindet (vgl. Bild 4).

4 Beispiel für die Deichbemessung auf probabilistischer Grundlage

Wenn das Damminnere nicht ausreichend erkundet ist, kann es zu Abweichungen zwischen dem berechneten Sickerwasserströmungsfeld und den Beobachtungen hinsichtlich Durchfeuchtungen und Wasseraustritten kommen.

Eine Qualifizierung des Ergebnisses kann jedoch erreicht werden, wenn die mit der Erkundung verbundene Datenunsicherheit durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Bodenkennwerte innerhalb möglicher Schwankungsbreiten erfaßt wird. Durch n-mal wiederholte Berechnungen mit zufälligen Kombinationen der Bodenkennwerte ergeben sich n Ergebnisse in Bezug auf die Lage der Sickerlinie oder der Standsicherheit, welche wiederum durch eine Verteilung beschrieben werden können. Mit dieser Methode der statistischen Versuche (Monte-Carlo-Methode) lassen sich beispielsweise Sickerlinien angeben, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit unterschritten werden, was in Bild 4 schematisch dargestellt ist. Dabei wurde angenommen, daß die Durchlässigkeitsbeiwerte für die vorhandenen Böden um bis zu einer Zehnerpotenz nach oben und unten abweichen können und in diesem Bereich logarithmisch gleichverteilt sind.

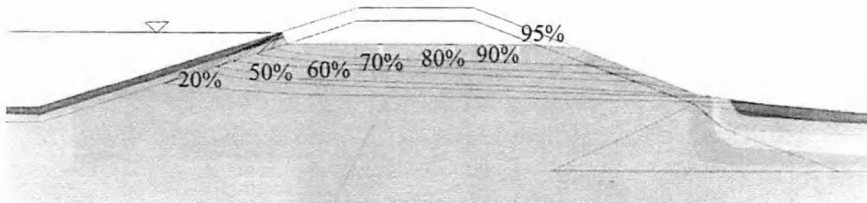


Bild 4: Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die Lage der Sickerlinie infolge Datenunsicherheit der Durchlässigkeiten (schematische Darstellung für den Kanaldamm des Oder-Spree-Kanals in Eisenhüttenstadt)

Die Berechnungsergebnisse für die Standsicherheit zeigen, daß für einen ungünstigen Fall (von dem mit 95% Wahrscheinlichkeit erwartet wird, daß die Standsicherheit größer ist) wegen $\eta = 0,9$ mit einem Böschungsbruch zu rechnen ist (Bild 5 oben). Aber es kann sich bei entsprechender Kombination der Durchlässigkeitsbeiwerte auch eine ausreichende Standsicherheit wie in Bild 5 unten mit $\eta = 1,53$ ergeben (nur mit 20% Wahrscheinlichkeit wird eine noch höhere Standsicherheit erwartet). Es liegen also für einen Querschnitt zwei unterschiedliche Aussagen vor.

Wenn die Wahrscheinlichkeitsverteilung, wie sie der Bild 4 zu Grunde liegt, für die Berechnung der Standsicherheit der luftseitigen Böschung verwendet wird,

läßt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der jeweils erreichten Sicherheiten gegenüber Böschungsbruch durch Gleiten angeben (Bild 6). Demnach beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit bei der gegebenen Geometrie und dem gegebenen Wasserstand im stationären Durchströmungsfall etwa 8% (Bruchkriterium $\eta < 1$). Mit einer Wahrscheinlichkeit von 55% überschreitet die Sicherheit den angestrebten Wert von $\eta = 1,3$. Dabei muß berücksichtigt werden, daß es sich um bedingte Wahrscheinlichkeiten handelt, die das Eintreten des Bemessungswasserstandes voraussetzen und nur von der Datenunsicherheit hinsichtlich der Durchlässigkeitsbeiwerte beeinflusst werden.

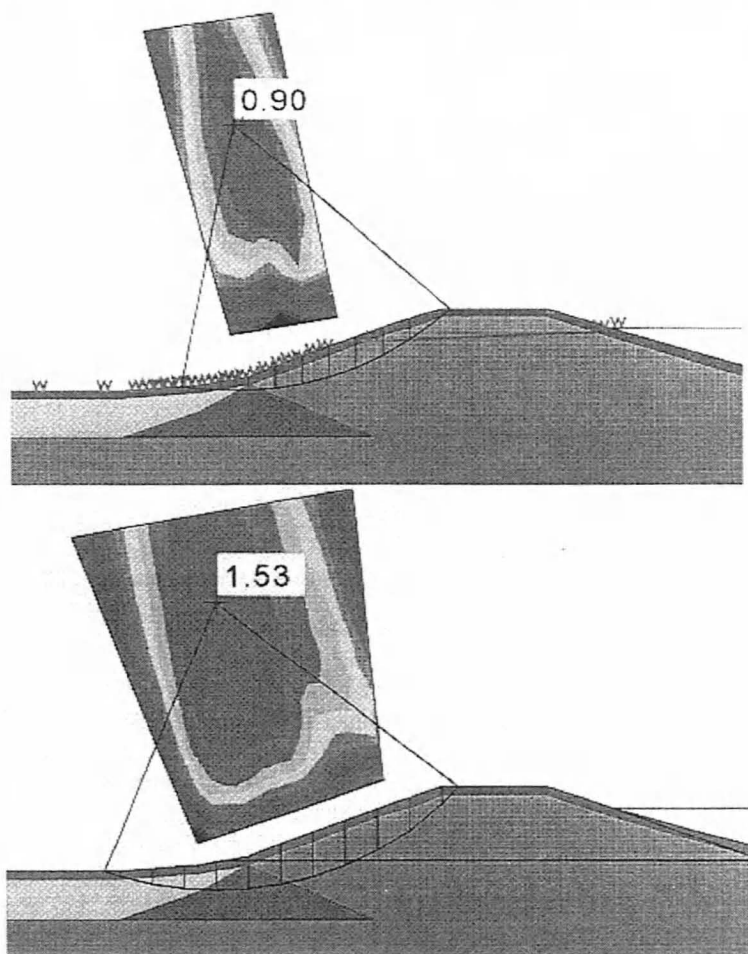


Bild 5 Standsicherheit mit 95% (oben) und 20% Überschreitungswahrscheinlichkeit entsprechend Bild 4

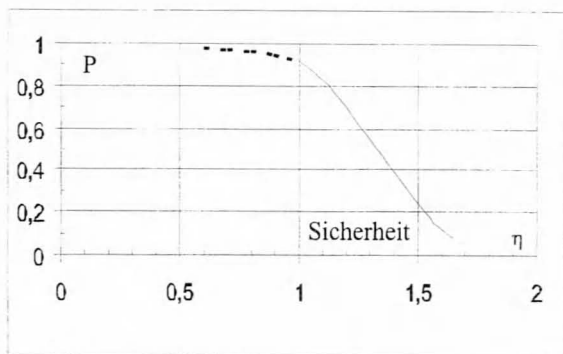


Bild 6: Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Sicherheit gegenüber Böschungsgleitbruch



Bild 7: Kanaldamm Oder-Spree-Kanal, Eisenhüttenstadt: Rutschungen auf der Luftseite (Foto: Verfasser)

Das Foto in Bild 7 zeigt, daß der mit $P = 8\%$ berechnete Versagensfall bedauerlicherweise eingetreten ist. Dabei könnten noch Verkehrslasten durch die Befahrung der Dammkrone im Zusammenhang mit der Deichverteidigung eine Rolle gespielt haben, die rechnerisch nicht berücksichtigt wurden. Es ist zu erkennen, daß der Beginn der Gleitfläche wie in der Rechnung (Bild 5) auf der Krone liegt.

5 Zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten

Zur Interpretation dieses Wertes ist die Festlegung zulässiger Versagenswahrscheinlichkeiten erforderlich, für die es aber derzeit noch keine allgemein anerkannten Werte gibt. In der Literatur gibt es lediglich Vorschläge verschiedener Autoren für die jeweiligen Bauwerke, die sich u.a. nach der Bauart und dem Gefährdungspotential richten.

Freudenthal [3] schlägt für die zulässige Gesamtversagenswahrscheinlichkeit eines großen Bauwerkes $P \leq 10^{-2}$ vor, wenn Schadenskosten die Neubaukosten nicht wesentlich überschreiten. Bei deutlich höheren Schadenskosten empfiehlt er

$P \leq 10^{-3}$, also einen Versagensfall in durchschnittlich 1000 Jahren. Für die Überströmung von Seedeichen infolge Hochwasser wird in den Niederlanden in dichter besiedelten Gebieten $P \leq 10^{-4}$ und in weniger besiedelten Gebieten $P \leq 2,5 \cdot 10^{-4}$ zugelassen.

Das Gesamtversagen im oben dargestellten Beispiel liegt unter Berücksichtigung der Hochwasserwahrscheinlichkeit im Bereich der von [3] angegebenen Werte zwischen 10^{-2} und 10^{-3} .

6 Schlußfolgerungen, Ausblick

Mit Hilfe eines statistischen Modells ist versucht worden, das Kollektiv möglicher Berechnungsergebnisse, welches sich auf Grund der Streuung der Eingangsdaten einstellen kann, mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung quantitativ zu beschreiben. Unter Einbeziehung der Eintrittswahrscheinlichkeit für den verwendeten Hochwasserstand ergibt sich im vorgestellten Berechnungsbeispiel eine Versagenswahrscheinlichkeit für die Standsicherheit der luftseitigen Böschung zwischen 10^{-2} und 10^{-3} pro Jahr in Abhängigkeit vom Wiederkehrintervall des Hochwasserstandes. Für die praktische Anwendung der beschriebenen Bemessungsmethode bedarf es zukünftig noch anerkannter Werte für zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten.

Obwohl in der Öffentlichkeit ein Akzeptanzwiderspruch zwischen freiwillig übernommenen Risiken (Benutzung von Verkehrsmitteln, Risikosportarten, Lebensversicherung) und unfreiwillig übernommenen Risiken (Industrieanlagen, Gefährdungspotential durch bestimmte Ingenieurbauwerke) besteht, ist anzunehmen, daß sich die probabilistisch geprägte Denkweise und dementsprechende Bemessungsverfahren weiterhin durchsetzen werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Buß, J.: Unterströmung von Deichen.- In: Mitt d. Franzius-Inst. der TU Braunschweig 1987, (92)
- [2] Franke, D., Pohl, R., Engel, H., Niesche, H. Krüger, F.: Das Oder-Hochwasser 1997, Ursachen der Deichschäden.- In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik 1998 (in Vorbereitung)
- [3] Freudenthal, A.M.: Safety and reliability of large engineering structures.- In: Symposium of the National Academy of Engineering, Washington, D.C. 1970
- [4] Ludewig, M. ; Pohl, R.: Stauanlagen (Kap.4).- In: Wiegleb, K.: Taschenbuch Verkehrs- und Tiefbau, Bd. 4 .- Berlin: Verlag für Bauwesen, 1990, ISBN 3-345-00297-3
- [5] Plate, E.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure.- Berlin: Verl. W. Ernst & Sohn, 1993
- [6] Pohl, R.: Die Überflutungssicherheit von Talsperren.- In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 11/1997, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik ISSN 0949-5061, ISBN 3-86005-186-5

Anschrift des Verfassers:

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. R. Pohl
TU Dresden, Inst. f. Wasserbau und THM
01062 Dresden
e-mail: pohl@bbbrs5.bau.tu-dresden.de

