Über die Untersuchungsergebnisse und Sicherungsmaßnahmen, evtl. auch Sanierungsverfahren wird nach Abschluß der Arbeiten berichtet werden.

Durchlässigkeitsprüfungen an Deponieabdichtungen bei der Qualitätslenkung

von M. Stadel und H.-G. Kempfert*

Einleitung

In den für den Deponiebau maßgebenden Vorschriften, Empfehlungen und Merkblättern (siehe auch HORN, 1992) sind Art und Umfang der Qualitätssicherung festgelegt, die als Teil des Deponieentwurfs in einem Qualitätssicherungsplan aufzustellen sind. Die Qualitätssicherung hilft dabei, die Wirksamkeit und Funktionstüchtigkeit mineralischer Deponieabdichtungen durch die Beurteilung erdbautechnischer Ausführungen sicherzustellen, womit ihr ein hoher Stellenwert innerhalb des Gesamtbauwerks Deponie zukommt, da eine mineralische Abdichtung als Ganzes flächenhaft funktionstüchtig sein muß.

Mit dem Beitrag von SLABIK in der Geotechnik 15 (1992) wurden, gerade was die Durchlässigkeitsprüfung während der Bauausführung angeht, gewisse Forderungen hinsichtlich der Versuchsdurchführung in Frage gestellt, da diese die Qualitätslenkung durch einen sehr großen Zeitaufwand eher behindern, als daß sie dienlich sind. Weiterhin wurde die Meinung geäußert, vollständig auf Durchlässigkeitsprüfungen während der Bauausführung zu verzichten, wenn die im Feld zu prüfenden bodenmechanischen Kenngrößen die im Deponieentwurf festgelegten Einbaubedingungen bestätigen.

Dies hat die Verfasser veranlaßt, ihre eigenen Erfahrungen hinsichtlich der Durchlässigkeitsprüfung an Deponieabdichtungen im Rahmen der Qualitätslenkung während der Bauausführung mitzuteilen sowie die Verwendung einer aus ihrer Sicht angemessenen, der Qualtitätssicherung für alle Beteiligten dienlichen Versuchsdurchführung aufzuzeigen.

Obwohl die neben der Identität des Erdstoffs wohl relevantesten zu prüfenden bodenmechanischen Kenngrößen im Feld der Einbauwassergehalt und die damit für eine vorgegebene Verdichtungsart und -leistung erreichte Trockendichte sind und sich dadurch mit den im Deponieentwurf festgelegten Einbaubedingungen die erreichte Durchlässigkeit weitgehend abgesichert beurteilen läßt, halten wir Durchlässigkeitsprüfungen zur Beurteilung erdbautechnischer Ausführungen im Deponiebau während der Bauausführung für unerläßlich.

Prüfdaten im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung mit Hilfe konventioneller Prüfverfahren im Feld werden bekanntlich punktuell gewonnen. Über die zwischen den einzelnen Versuchspunkten erreichten Einbaubedingungen wird kein quantitatives Ergebnis gewonnen; daher erscheint es unverzichtbar, durch die visuelle Überwachung beim Einbau im Bereich vermuteter Fehl- oder Schwachstellen gezielt Proben zu entnehmen und diese auch auf ihre Durchlässigkeit hin zu untersuchen. SHACKELFORD/JAVED (1991) haben gezeigt, daß bei feinkörnigen Böden mit hohem Schlämmkornanteil verarbeitungstechnisch bedingte Schwachstellen (inhomogen geschaffene äußere Struktur des Erstoffes) für das in der Eignungsprüfung festgestellte Durchlässigkeitsverhalten nicht repräsentativ sind und daher einer Beurteilungvor Ort bedürfen.

Angemessene Versuchsdurchführung

Für die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen bei gleichem Versuchsgerät und gleichen Versuchsrandbedingungen sollte grundsätzlich festgelegt werden, ob der vorhandene Sättigungsgrad einer Probe vor der Durchlässigkeitsprüfung bis nahe zur vollständigen Sättigung erhöht wird, oder ob der Probenzustand nach der Verdichtung (teilgesättigt) als Ausgangszustand für die Durchlässigkeitsprüfung zugrundegelegt wird.

SCHUSTER (1986) vertritt die Ansicht, daß die vollständige Probensättigung als generelle Versuchsrandbedingung nicht zweckmäßig ist, da es sich bei der Ausführung mineralischer Dichtungsschichten immer um teilgesättigte Böden handelt und die Veränderung des Sättigungsgrades bei der in-situ Durchströmung so gering ist, daß der Zustand der vollen Sättigung nie erreicht wird. Die Festlegung der teilweisen Sättigung als Versuchsrandbedingung für Durchlässigkeitsprüfungen im Labor setzt jedoch eine entsprechende Versuchseinrichtung voraus, mit der die Veränderung der Sättigung als Folge der Durchströmung während der Strömungsphase und damit die Auswirkungen auf die Durchlässigkeit als Kenngröße berücksichtigt werden kann. Ist dies versuchstechnisch nicht möglich, wovon hier aufgrund der i.a. vorhandenen Laborausstattung ausgegangen wird, darf sich die Probensättigung während der Durchströmung des Bodens nicht ändern, was, wie in DIN 18130 Teil 1 angemerkt, am einfachsten durch die vollständige Sättigung der Probe durch Aufbringen eines

*Dipl.-Ing.(FH) M. Stadel und Prof.Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Ingenieurgemeinschaft Kempfert + Partner, Konstanz

Anmerkung der Redaktion
Eine Zuschrift zum Beitrag von Herrn Slabik und die zusammenfassende Erwiderung des Verfassers werden im nächsten Heft der GEOTECHNIK erscheinen.

Sättigungsdruckes (back pressure) erreicht wird. Der Meinung, daß die vollständige Sättigung auch gegeben ist, wenn bei konstanten Versuchsrandbedingungen die in der Zeiteinheit in die Probe einströmende der aus ihr austretenden Wassermenge gleich ist (stationärer Strömungszustand), muß hier zumindest für feinkörnige Böden, wie sie im Deponiebau zur Anwendung kommen, wiedersprochen werden.

DUNN/MITCHELL (1984) haben an durchströmten Proben aus feinkörnigen Böden den sich einstellenden stationären Strömungszustand mit der dabei erreichten Sättigung auf der Grundlage von Skemptons B-Koeffizient verglichen. Obwohl in allen Versuchen die ein- und ausströmende Wassermenge gleich groß war, wurden B-Koeffizienten lediglich bis 0,75 ermittelt.

Damit ist die Forderung der eindeutigen Versuchsrandbedingung nur durch einen erheblichen zeitlichen Aufwand zur vollständigen Probensättigung bzw. durch eine entsprechende Versuchseinrichtung, mit der die Veränderung der Sättigung berücksichtigt werden kann, einzuhalten. Es sollte bewußt auf die strenge Erfüllung der eindeutigen Versuchsrandbedingungen verzichtet werden. Diese Ansicht vorausgesetzt, stehen grundsätzlich Versuche sowohl mit als auch ohne Sättigung zur Verfügung. Um dennoch eine angemessene, der Qualitätslenkung insgesamt dienliche Versuchsdurchführung zu schaffen, sehen wir durch das Aufbringen eines Sättigungsdruckes einen erheblichen zeitlichen Vorteil gegenüber der Versuchsdurchführung ohne Probensättigung, da sich schon nach relativ kurzer Zeit ein stationärer Strömungszustand einstellt, so daß konstante Durchlässigkeiten gemessen werden können.

Eigene Erfahrungen

Nach unseren Erfahrungen über Durchlässigkeitsprüfungen im Deponiebau hat sich der Einsatz einer Durchlässigkeitszelle bewährt, die von RUPPERT/STIRIZ (1989) vorgestellt wurde. Die Durchlässigkeitszelle zeichnet sich durch eine flexible Berandung der Probe zur wirksamen Verhinderung von Randumläufigkeiten aus sowie dadurch, daß beliebig hohe Seiten-, Sättigungs- und Durchströmungdrücke aufgebracht werden können. Einzelheiten der Gerätebeschreibung, des Probeneinbaus sowie der Versuchsanordnung können RUPPERT/STIRIZ (1989) entnommen werden. Die Zelle wurde so konzipiert, daß die Probe entweder unmittelbar aus dem Ausstechzylinder oder nach vorherigem Ablängen in den Versuchszylinder eingeschoben werden kann. Der Durchströmungsdruck wird über eine Probenendfläche dem Sättigungsdruck u_0 überlagernd aufgebracht und damit der Strömungsvorgang eingeleitet. Zur Verhinderung von Randumläufigkeiten bleibt der neben dem Sättigungsdruck u_0 wirkende Anteil am Seitendruck σ_3 um 20 % höher eingestellt als der Oberwasserdruck p_0. Der anisotrope Spannungszustand, dem die Probe während der Durchströmung unterliegt und der sich entsprechend dem Abbau des Strömungsdruckes über die Probenhöhe ändert, ist in Bild 1 dargestellt. Um eine nahezu vollständige Sättigung der Probe und einen sich möglichst schnell einstellenden stationären Strömungszustand zu erreichen, sollte der Sättigungsdruck im Gegensatz zu DIN 18130 Teil 1 auch bei hoher Ausgangssättigung der Proben nicht unter 500 kN/m² liegen.

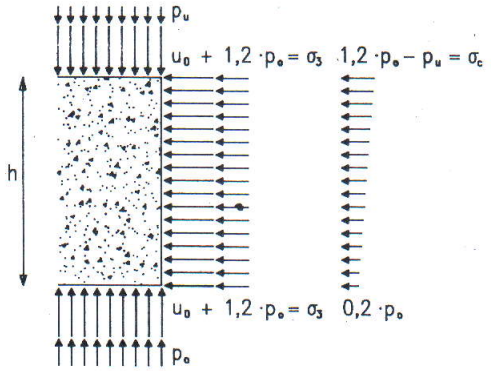

Bild 1 Anisotroper Spannungszustand der Probe während der Durchströmung
u_0 - Sättigungsdruck
p_0 - Oberwasserdruck
p_u - Unterwasserdruck
σ_c - Konsolidationsspannung
σ_3 - Seitendruck
Hinweis: Hydrostatischer Wasserdruckanteil ist nicht berücksichtigt

Bild 2 zeigt einen typischen Verlauf der gemessenen Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von der Versuchdauer und der Größe des hydraulischen Gradienten für den ebenfalls in Bild 2 in seiner Kornverteilung dargestellten mittelplastischen Schluff bei unterschiedlichen Verdichtungszuständen. Der Durchlässigkeitsmessung geht eine Probensättigung (u_0 = 500 kN/m²) mit überlagernder Durchströmung und damit der gleichzeitigen anisotropen Konsolidation der Probe von mindestens 24 Stunden voraus. Die eigentliche Durchlässigkeitsbestimmung mit insgesamt drei Einzelmessungen im Anschluß an die Sättigung erscheint innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden ausreichend. Der Vergleich einer Vielzahl von Serienversuchen an fein- und gemischtkörnigen Böden (TAGLANG 1989) bestätigt, daß sich bereits nach etwa 24 h Sättigungs- bzw. Konsolidationsphase ein stationärer Strömungszustand einstellt, wodurch konstante Durchlässigkeiten gemessen werden können. Durch eine Verlängerung der Sättigungs- bzw. Konsolidationsphase läßt sich erfahrungsgemäß keine wesentliche Verbesserung der Versuchsergebnisse erreichen. Aus dem dargestellten Vorgehen ergibt sich damit ein Zeitbedarf für die gesamte Durchläs-

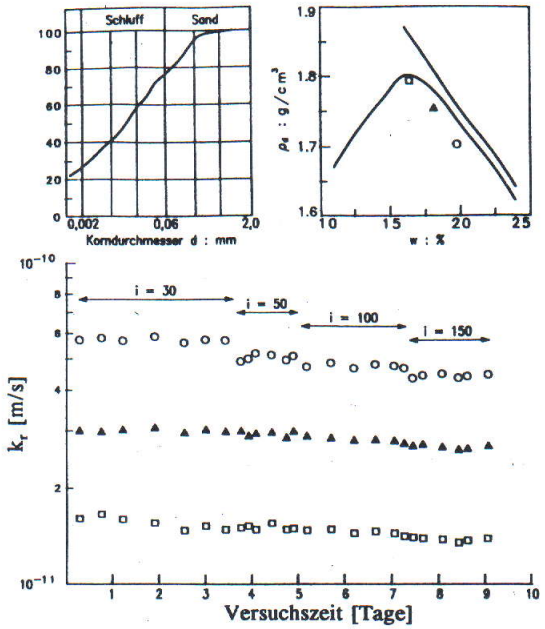

Bild 2 Verlauf der gemessenen Durchlässigkeiten über die Versuchszeit für unterschiedliche Verdichtungszustände des dargestellten Schluffs (Beispiel)

sigkeitsbestimmung von etwa 2 bis 3 Arbeitstagen, so daß die Prüfergebnisse innerhalb der Qualitätslenkung berücksichtigt werden können und sich damit die Qualität des Erdbauwerks steuern läßt.

Um in der relativ kurzen Meßzeitspanne für die 3 Einzelversuche von etwa 24 h die ohnehin sehr geringen, die Probe durchströmenden Wassermengen so groß wie möglich zu halten, erscheint es zweckmäßig, die Durchlässigkeitsbestimmung mit einem erhöhten Gradienten durchzuführen. Die in diesem Zusammenhang allgemein bekannte Forderung $i \leq 30$ zur Verhinderung von Strukturstörungen innerhalb der Probe (Suffusion) verhindert werden soll, halten wir zumindest bei gut abgestuftem Kornaufbau und ausreichender Verdichtung angesichts der schnellen Versuchsdurchführung für nicht gerechtfertigt. Zwar sollten die Proben grundsätzlich mit möglichst kleinen Gradienten durchströmt werden, um den hydraulischen Verhältnissen in-situ so nahe wie möglich zu kommen, doch muß andererseits die Versuchsdauer im Hinblick auf eine praktikable Qualitätslenkung angemessen sein.

In Bild 2 werden ferner die gemessenen Durchlässigkeiten bei unterhiedlich großen Gradienten nach jeweils abgeschlossener Konsolidation gezeigt, wobei sich tendenziell eine Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmender Größe des Gradienten erkennen läßt. Die Abnahme der Durchlässigkeit ist bei dieser Art der Versuchsdurchführung auf die versuchsbedingte Konsolidationsspannung σ_c (siehe Bild 1) zurückzuführen, die sich aus der zunehmenden Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterwasserdruck ergibt und eine Verringerung des Porenvolumens (anisotrope Verdichtung) zur Folge hat. Die Erhöhung des Gradienten führt auch zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks in der Probe, was sich immer mehr oder weniger stark auf die Größe der gemessenen Durchlässigkeit auswirkt, wie es sich auch bei SLABIK (1992) zeigt. Aus diesem Grund wird, wie o.g. von Versuchsbeginn an der Sättigung die gleichzeitige Durchströmung der Probe überlagert, so daß keine weitere Veränderung der Druckverhältnisse notwendig ist. Für die in Bild 2 dargestellten Verläufe der k-Werte lassen sich neben der geringen Verringerung der Durchlässigkeit auch bei Gradienten von i = 150 keine Anzeichen von Strukturstörungen erkennen. Dies bestätigen auch Serienversuche an fein- und gemischtkörnigen Böden bei unterschiedlich großen Gradienten (TAGLANG, 1989). Hydraulische Gradienten bis i = 100 sind u.E. zur schnellen Versuchsdurchführung bei entsprechend abgestuftem Kornaufbau und ausreichender Verdichtung, was i.d.R. für die im Deponiebau verwendeten Erdstoffe gegeben ist, durchaus vertretbar.

Die Abhängigkeit der gemessenen Durchlässigkeit von der versuchsbedingten Konsolidationsspannung (anisotrope Verdichtung) zeigt sich insbesondere bei höheren Gradienten. Bild 3 stellt den unmittelbaren Einfluß der Konsolidationsspannung für unterschiedlich stark verdichtete Proben des in Bild 2 dargestellten Schluffs bei einem konstanten hydraulischen Gradienten von i = 25 dar. Versuche von CARPENTER/-STEPHESON (1986) haben gezeigt, daß die in Bild 3 dargestellte Abhängigkeit bei großen Probendurchmessern und einem Höhen/Durchmesser-Verhältnis von h/d = 0,5 bis 1,0, wie es die vorgestellte Durchlässigkeitszelle aufweist, im Gegensatz zu kleineren Probendurchmessern und größeren Verhältnissen von h/d weniger ausgeprägt ist. Aus der Darstellung in Bild 3 ist weiterhin zu entnehmen, daß für die nach unserer Ansicht vertretbaren Gradienten bis i = 100 die

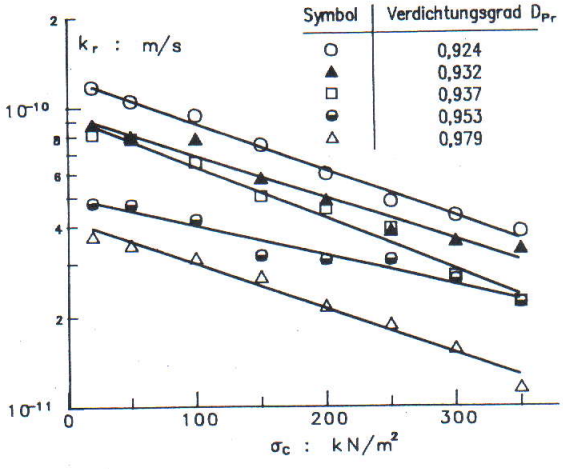

Bild 3 Einfluß der Konsolidationsspannung für unterschiedliche Verdichtungszustände auf die Größe der Durchlässigkeit bei i = 25 (Beispiel)

Versuche mit einer hierfür notwendigen Konsolidationsspannung von unter 100 kN/m² durchgeführt werden können. Der Einfluß von Konsolidationsspannungen innerhalb dieser Größenordnung auf die Größe der Durchlässigkeit ist relativ gering und kann vernachlässigt werden.

Für die Durchlässigkeitsbestimmung an durch z.B. Bentonit vergüteten Böden, die ebenfalls im Deponiebau eingesetzt werden, gelten eigene Gesetzmäßigkeiten zwischen Tondosierung und Größe des hydraulischen Gradienten, um Strukturstörungen zu verhindern (SCHUSTER, 1984).

Schlußbemerkung

Für die Beurteilung erdbautechnischer Ausführungen im Deponiebau sollte auf gezielte Durchlässigkeitsprüfungen während der Bauausführung abweichend von der von SLABIK (1992) vertretenen Meinung nicht verzichtet werden. Durch den Einsatz von angemessenen und leistungsfähigen Versuchsgeräten und -techniken mit kurzen Versuchszeiten ist es möglich, daß die Prüfergebnisse innerhalb der Qualitätslenkung berücksichtigt werden können.

Literatur

CARPENTER, G.W./ STEPHENSON, R.W. (1986): Permeability Testing in the Triaxial Cell. Geotechnical Testing Journal 9, S.3 - 9.

DUNN, R.J./ MITCHELL, J.K. (1984): Fluid Conductivity Testing of fine-grainded Soils. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE 110, S.1648 - 1665.

HORN, A. (1992): Untergrund, Basis- und Oberflächenabdichtungen von Abfalldeponien - Beitrag zur derzeitigen gesetzlichen Regelung und zum Stand der Technik. Bautechnik 69, S.462 - 473.

RUPPERT, F.-R./ STIRIZ, K.-H. (1989): Ein neues Gerät zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Böden. Geotechnik 12, S.14 - 16.

SCHUSTER, P. (1986): Experimentelle Untersuchungenüber das Verhalten von Silt-Sand-Fraktionen, die mit quellfähigem Ton vergütet werden. Mitt.131 des Institutes f.Grundbau u.Bodenmechanik der ETH Zürich.

SHACKELFORD, C.D./ JAVED, F. (1991): Large-Scale Laboratory Permeability Testing of a Compacted Clay Soil. Geotechnical Testing Journal 14, S.171 - 179.

SLABIK, W. (1992): Überprüfung der Wasserdurchlässigkeit von Deponieabdichtungen. Geotechnik 15, S. 73 - 77.

TAGLANG, A. (1989): Untersuchung von angemessenen Prüfformen bei Duchlässigkeitsfragen an Deponiebasisabdichtungen. Diplomarbeit aus dem Fachgebiet Geotechnik der Fachhochschule Konstanz (unveröffentlicht).

Zur Ingenieurgeologie in den alten Bundesländern

von K.-H. Heitfeld*

I. Einführung

Die Frage von Ausbildung und Lehre in Ingenieurgeologie wird in der Bundesrepublik seit der Gründung der Fachsektion Ingenieurgeologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft (DGG) im Jahre 1966 und seit 1970 auch in der gemeinsamen Fachsektion der DGG und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG) intensiv diskutiert. Seit diesem Zeitpunkt hat die Ingenieurgeologie, wie in vielen anderen Ländern, so auch in der Bundesrepublik einen damals nicht für möglich gehaltenen Aufschwung erfahren. Nachdem im Jahre 1970 der erste Lehrstuhl für Ingenieurgeologie in der Bundesrepublik in Aachen etabliert wurde, gibt es inzwischen eine ganze Reihe von ingenieurgeologischen Lehrstühlen, Fachgebieten und Professuren. Dabei weisen die einzelnen Hochschulen z.T. unterschiedliche Schwerpunkte in der Lehre und Ausbildung auf.

Um eine möglichst einheitliche und umfassene Ausbildung in der Ingenieurgeologie zu gewährleisten, wurde 1970 der Arbeitskreis Ausbildung und Lehre der Fachsektion Ingenieurgeologie ins Leben gerufen.

Bei den Diskussionen ging es zunächst um Änderungsvorschläge zur 1968 erlassenen Rahmenordnung für die Diplomprüfung Geologie und Paläontologie, wobei Ingenieurgeologie und Hydrogeologie eine stärkere Berücksichtigung und Wichtung erfahren sollten. Dabei wurde u.a. 1973 eine Fragebogenaktion durchgeführt, bei der Wissenschaftler und Praktiker aus Universitäten, Behörden und freier Wirtschaft Gelegenheit hatten, einen nach ihrer Ansicht idealen Ausbildungsgang des Ingenieurgeologen durch unterschiedliche Bewertung von insgesamt 60 Fächern aufzuzeigen. Die Auswertung ergab außer für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie sowie die geowissenschaftlichen Hauptfächer (Allgemeine Geologie, Tektonik, Regionale und Historische Geologie, Petrographie) eine besondere Gewichtung bei Mathematik, Bodenmechanik, Felsmechanik, Grundbau und weiteren technischen Fächern. Interessant ist, daß im Jahre 1973 Umweltprobleme noch nicht zu den wichtigsten Fächern zählten. Die Auswertung hat im Grunde gezeigt, daß eine sinnvolle Ingenieurgeologen-Ausbildung nur an den Technischen Universitäten möglich ist.

II. Stellung der Ingenieurgeologie

In Abb. 1 ist die Stellung der Ingenieurgeologie unter Berücksichtigung neuer Arbeitsfelder im Bereich Umweltschutz dargestellt. Wichtigste Grundlage ist

* Ingenieurbüro Heitfeld - Schetelig GmbH, Aachen