Die Qualität verdichteter mineralischer Erdstoffe im Deponiebau

Von Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert und Michael Stadel

1. Einführung

Die erdbautechnische Verarbeitung mineralischer Erdstoffe als Deponieabdichtungen hat sich in den letzten Jahren aufgrund von deponietechnischen Erfahrungen immer stärker durchgesetzt und langfristig gesehen als ein natürliches Erdbauwerk zu dem wohl wichtigsten Sicherheitselement innerhalb des Gesamtbauwerks Deponie herausgestellt. Unter mineralischen Erdstoffen werden nachfolgend bindige, fein- und gemischtkörnige Böden[1]) verstanden, wie sie gerade im Deponiebau aufgrund ihrer dichtenden Eigenschaften zum Einsatz kommen[2]). Mit Hilfe einer gezielt gesteuerten Verdichtung lassen sich fein- und gemischtkörnige Böden erdbautechnisch so verarbeiten, daß eine äußerst geringe Wasserdurchlässigkeit erreicht wird, was auf die strukturellen Eigenschaften der Feinkornanteile der Böden zurückzuführen ist. Dem Verständnis zwischen der Verdichtung fein- und gemischtkörniger Böden und den damit erdbautechnisch steuerbaren bodenmechanischen Eigenschaften, wie Struktur, Durchlässigkeit, Scherfestigkeit, Zusammendrückbarkeit und Schrumpfverhalten, kommt eine besondere Bedeutung zu, die neben weiteren wichtigen Gesichtspunkten wie z. B. die Wahl eines geeigneten Deponiestandorts ganz entscheidend sind für eine sichere und umweltverträgliche Abfallentsorgung.

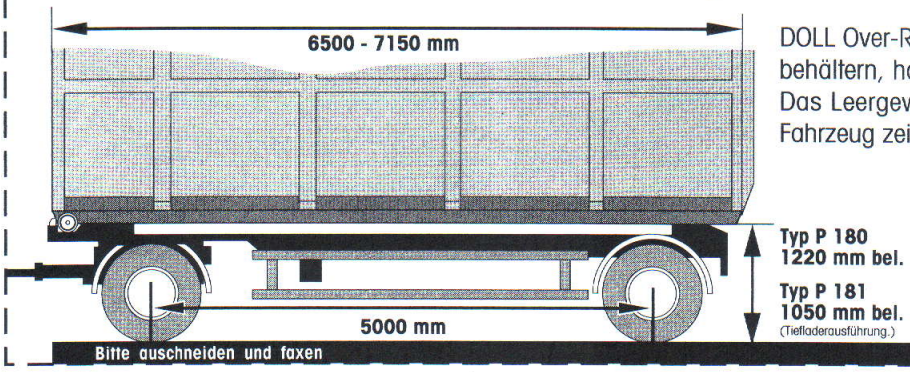
Ein weiterer entscheidender Aspekt, der bei der Planung und Ausführung von mineralischen Deponieabdichtungen berücksichtigt werden muß, liegt in der Übertragbarkeit der unter Laborbedingungen gewonnenen Versuchsergebnisse auf die Verhältnisse im Feld. Es ist hinreichend bekannt, daß die Verdichtung im Feld nicht im gleichen Maße kontrolliert und gesteuert werden kann wie unter Laborbedingungen, wofür eine Vielzahl von Ursachen verantwortlich sind, was zweifellos als ein Nachteil für die Sicherheit einer Deponie anzusehen ist. Zu den Ursachen zählt u. a. die jeweils unterschiedliche Aggregatgröße (Erdklumpen) eines natürlich gewonnenen Bodens, der im Labor und im Feld verarbeitet wird. Der Verdichtung im Labor geht schon aufgrund der definierten Probenabmessungen je nach Bodenart und Zusammensetzung eine Zerkleinerung (Größtkorn- bzw. Aggregatsgrößenbeschänkung) und Durchmischung der natürlichen Aggregatgröße voraus, was für die Verdichtung im Feld nicht der Fall ist. *Daniel (1981)* hat durch Laborversuche aufgezeigt, daß eine Zunahme der Aggregatgröße eine deutliche Erhöhung der Durchlässigkeit zur Folge hat, was auf die je nach eingebauter Aggregatsgröße verbundene, mehr oder weniger starke Hohlraum- bzw. Porenbildung zwischen den einzelnen Erdklumpen innerhalb des verdichteten Erdstoffs zurückzuführen ist. Auch die Durchfeuchtung des Bodens im Labor infolge der vorausgegangenen Durchmischung ist viel gleichmäßiger als im Feld, was bestimmte bodenmechanische Eigenschaften entscheidend beeinflußt, wie sich nachfolgend noch zeigen wird.

Die Verdichtung im praktischen Laborbetrieb erfolgt überwiegend durch eine rammende Art der Verdichtung mit Hilfe des Proctorversuchs nach DIN 18127, dessen geleistete Verdichtungsarbeit mit der im Feld erreichten oftmals gut übereinstimmt, obwohl die Art der Beanspruchung die Verhältnisse im Feld nicht zutreffend beschreibt. Daneben sind die statische Verdichtung, bei der Erdstoff unter statischem Druck in einer Probenform zu einer kompakten Masse verdich-

1 Nach DIN 18196 gilt: Gemischtkörnige Böden sind Böden mit einem Kornanteil < 0,06 mm von 5 bis 40 Gew.-%. Feinkörnige Böden sind Böden mit einem Feinkornanteil < 0,06 mm von mehr als 40 Gew.-%.

2 Durch Zusätze wie z. B. mit Bentonit vergütete grobkörnige Böden, die ebenfalls ihren Einsatz im Deponiebau finden, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

DOLL Over-Roll – bringt so einiges in´s Rollen.



DOLL Over-Roll, der Anhänger zur Aufnahme von Abrollbehältern, hat sich im täglichen Praxiseinsatz bewährt. Das Leergewicht liegt bei ca. 3,2 t. Mehr über dieses Fahrzeug zeigen wir Ihnen gern:

DOLL®

DOLL Fahrzeugbau GmbH
Industriestraße 13, 77728 Oppenau
Tel. 07804/49-0, Fax 07804/49-115

Bitte auschneiden und faxen

Bitte auschneiden und faxen MA

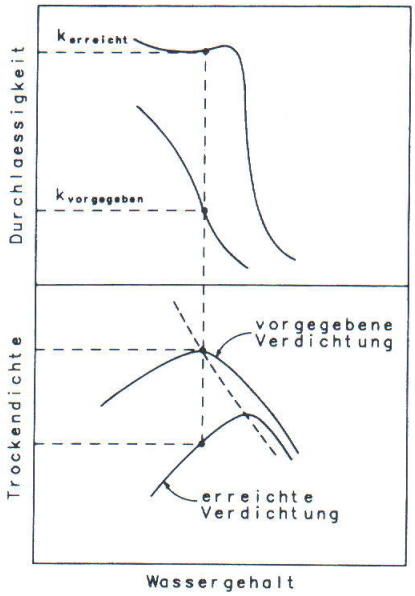


Abb. 1: Vergleich zwischen aus Laborversuchen vorgegebener und im Feld geleisteter Verdichtungsarbeit und daraus resultierende mögliche Auswirkungen auf die Durchlässigkeit. Nach *Daniel (1981)*.

tet wird, sowie die aus dem englischen Sprachraum stammende knetende Art der Verdichtung *(Harvard miniature compaction)* bekannt. Obwohl im Laborbetrieb die knetende Art der Verdichtung die am wenigsten verbreitete ist, trifft sie die Verhältnisse im Feld durch das Einbringen von Scherdeformationen in den Boden während der Verdichtung, wie es z. B. bei einer Schaffußwalze der Fall ist, am besten *(Turnbull, 1950)*.

Die Durchlässigkeit fein- und gemischtkörniger Böden reagiert empfindlich auf die geleistete Verdichtungsarbeit. Sofern daher die im Labor durch entsprechende Eignungsversuche festgelegten Einbaukriterien im Feld nicht erreicht werden, verschiebt sich der optimale Wassergehalt und die Durchlässigkeit kann sich dadurch merklich erhöhen, wie es die qualitative Darstellung in Abbildung 1 verdeutlicht.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Kenntnisstand über die bodenmechanischen Zusammenhänge und die erdbautechnisch steuerbaren Eigenschaften verdichteter fein- und gemischtkörniger Böden darzustellen, deren Verständnis zur Herstellung funktionstüchtiger und wirksamer mineralischer Deponieabdichtungen grundlegend ist. Art und Umfang der üblichen Qualitätslenkung für Erdbauwerke im Deponiebau während der Bauausführung, wie sie die einschlägigen Normen, Empfehlungen und Merkblätter vorsehen, werden daraufhin kritisch betrachtet. Als Konsequenz hieraus wird ein neueres erdbautechnisches Prüfverfahren im Hinblick auf den möglichen Einsatz im Deponiebau vorgestellt sowie dessen Leistungsfähigkeit und derzeitige Grenzen aufgezeigt.

2. Bodenmechanische Eigenschaften verdichteter fein- und gemischtkörniger Böden

2.1 Einfluß der Verdichtung auf die Struktur fein- und gemischtkörniger Böden

Die Wirkung einer Verdichtung hängt zum einen von den Eigenschaften des zu verdichtenden Bodens und zum anderen von der übertragenen Verdichtungsenergie (geleistete Arbeit) ab. Für den Boden sind es hierbei die Art, dessen Zustand und innere Struktur, die die Verdichtungseigenschaften beeinflussen. Für die Verdichtungsenergie sind es die geleistete Arbeit sowie die Art und Weise der Energieübertragung. Mit der durch die Verdichtung hervorgerufenen Strukturänderung innerhalb des Bodens, insbesondere bei feinkörnigen Böden, ändern sich zugleich seine bodenmechanischen Eigenschaften, die wiederum entscheidend sind für die Funktionstüchtigkeit und Sicherheit mineralischer Deponieabdichtungen.

Je nachdem, ob ein Boden auf der *trockenen* Seite der Verdichtungskurve ($w < w_{opt}$) oder der *nassen* Seite der Verdichtungkurve ($w > w_{opt}$) eingebaut wurde, stellt sich seine innere Struktur infolge der eingebrachten Energie anders dar. Es ist festzustellen, daß sich bei einer Verdichtung auf der *nassen* Seite mit zunehmender Plastizität des Bodens eine gleichmäßiger geordnete Struktur einstellt als auf der *trockenen* Seite. Dies ist auf das unterschiedliche Wasserbindevermögen der Böden zurückzuführen. Mit zunehmendem Wassergehalt vergrößert sich die Dicke der diffusen Wasserhülle, die die Teilchen umgibt und damit eine größere Beweglichkeit dieser zuläßt. Gleichzeitig ordnen sich die Teilchen bei zunehmender Beweglichkeit infolge der geleisteten Verdichtungsarbeit senkrecht zur Verdichtungsrichtung aus. Eine Verdichtung auf der *trockenen* Seite hingegen führt zu einer ganz unregelmäßigen Struktur des Bodens.

Die bei einer Verdichtung mit zunehmender Wasserbindung des Bodens verbundene Strukturänderung ist in Abbildung 2 am Beispiel eines Tones bei kleiner und großer geleisteter Verdichtungsarbeit dargestellt. Im Punkt A reicht das im Boden gebundene Wasser w_A nicht aus, um eine geordnete Struktur der Teilchen zu schaffen, da die durch die unterschiedliche elektrische Ladung zwischen dem Wasser und den Teilchen wirkenden Bindekräfte infolge des geringen Wassergehalts w_A die Teilchen koagulieren läßt, wobei dies ganz unregelmäßig geschieht und keine Ordnung herrscht (kartenhausähnliche Struktur). Koagulieren im Sinne von Abbildung 2 bedeutet ein geringer Ordnungsgrad der Teilchen sowie eine durch die Verdichtung gering erreichte Dichte des Bodens.

Nimmt der Wassergehalt von w_A auf w_B zu, so nehmen die Bindekräfte zwischen den Teilchen durch die

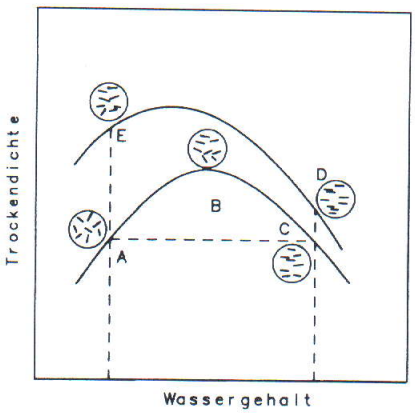


Abb. 2: Strukturänderung bei einem Ton infolge Verdichtung. Nach *Lambe (1958)*.

erhöhte Wasserbindung ab, und die Teilchen ordnen sich zunehmend gleichmäßiger, in zueinander paralleler Richtung aus, sie dispergieren. Es stellt sich, verglichen mit dem Zustand im Punkt A, eine geordnetere Struktur mit höherer Dichte ein. Eine weitere Zunahme des Wassergehalts von w_B auf w_C bewirkt zwar eine größere Ordnung der Teilchen, doch nimmt die Dichte ab, da durch die weitere Bindung von Wasser die diffuse Wasserhülle um die Teilchen einen immer größeren Raum einnimmt. Wird die Verdichtungsarbeit gesteigert, so stellt sich eine insgesamt gleichmäßigere Ordnung durch die Umordnung der Teilchen (Punkt E) bzw. durch die Reduzierung der Dicke der diffusen Wasserhüllen um die Teilchen (Punkt D) ein, womit auch die Dichte größer wird. Der Grad der Umordnung der Teilchen, der sich durch eine Verdichtung bei zunehmendem Wassergehalt einstellt, ist in starkem Maße von dessen natürlichem Ausgangszustand abhängig und kann für Böden, die z. B. auf der *trockenen* Seite fast völlig dispergiert oder auf der *nassen* Seite noch teilweise koaguliert sind, weitaus geringer sein, als in Abbildung 2 qualitativ dargestellt.

Mit Hilfe der sog. *Mitchell-Methode* läßt sich der Orientierungsgrad der Teilchen auf optischem Wege qualitativ bestimmen *(Mitchell, 1956).* Hierzu durchgeführte Untersuchungen sind in Abbildung 3 dargestellt und belegen quantitativ die in Abbildung 2 erläuterten Zusammenhänge.

2.2 Einfluß der Verdichtung auf die Durchlässigkeit fein- und gemischtkörniger Böden

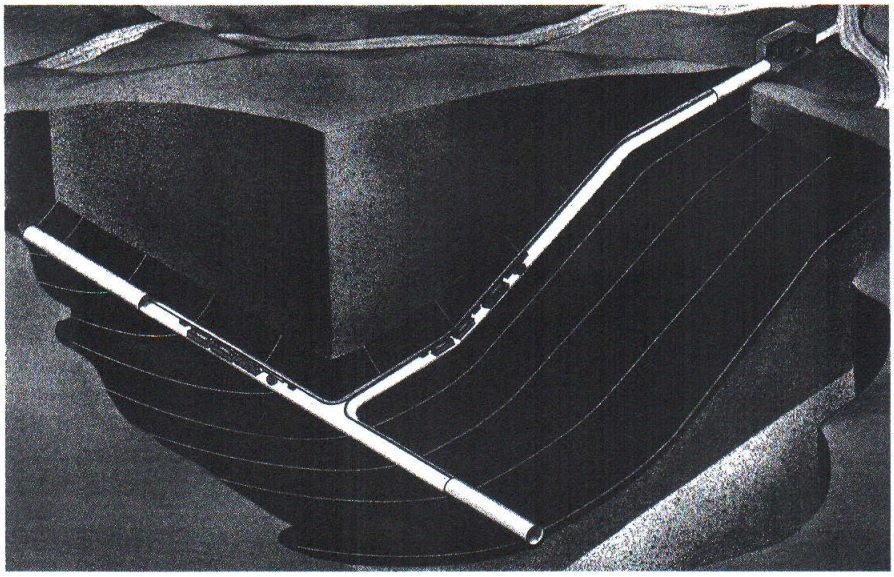
Im Gegensatz zu grobkörnigen Böden, bei denen die geringste Durchlässigkeit bei der größten Trockendichte, also dann, wenn der Boden mit dem optimalen Wassergehalt eingebaut wurde, erreicht wird, hängt die Durchlässigkeit von fein- und gemischtkörnigen Böden auch von der Struktur des Bodens ab. Abbildung 4, die den Durchlässigkeitsverlauf für auf 1,73 t/m³ verdichtete Proben (ρ_{Pr} = 1,83 t/m³, w_{Pr} = 16,5 %) aus einem schluffigen Ton bei Sättigungsgraden von 90 und 95 % aufzeigt, macht dies deutlich. Die Durchlässigkeit für die auf der *trockenen* Seite verdichteten Proben nimmt bis etwa zum optimalen Wassergehalt leicht zu. Für die auf der *nassen* Seite verdichteten Proben fällt die Durchlässigkeit hingegen abrupt ab, sie weisen eine um etwa drei Zehnerpotenzen geringere Durchlässigkeit auf als die auf der *trokkenen* Seite verdichteten Proben.

Betrachtet man den Verlauf der Durchlässigkeit nicht wie in Abbildung 4 für eine konstante Größe der Trokkendichte, sondern für die auf einer Verdichtungskurve bei unterschiedlichen Wassergehalten gelegenen Trokkendichten bzw. Verdichtungsgraden, so bekommt man einen in Abbildung 5 dargestellten typischen Verlauf der Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Die Durchlässigkeit nimmt auf der *trockenen* Seite bei zunehmendem Wassergehalt deutlich ab und

TRANSPORTSYSTEME FÜR STOLLEN- UND TUNNELBAU

Stollenbefahrung

Bei der Planung und beim Bau von Deponien gewinnt die Kontrolle von Deponiesickerwässern und Deponiegasen zunehmende Bedeutung. Zu diesem Zweck werden in bestehende und neu entwickelte Deponien Kontrollstollen eingebaut.
Die Maschinenfabrik Scharf GmbH bietet für das Befahren von Stollen und Schächten eine umfangreiche Palette von Transportsystemen an. Hierzu gehören Einschienenhänge- oder Schienenflurbahnen, die seilbetrieben oder mit Eigenantrieb ausgerüstet werden können.
Diese Transportsysteme sind auf vielfältige Anforderungen wie enge Querschnitte, große Neigungen, hohe Einzellasten und Explosionsschutz ausgelegt, und werden für die Beförderung von Personen und Material, die Bergung von Verletzten oder auch zum Umsetzen der Hochdruckreinigungspumpen im Stollen eingesetzt.



Zum weiteren Produktionsprogramm der Maschinenfabrik Scharf GmbH gehören Kanalbefahrungs- und Sanierungsgeräte, Containerumsetzeinrichtungen für Kompostieranlagen, Fahrzeuge für den Tief- und Tunnelbau und Systemlösungen für anspruchsvolle Transportaufgaben. Fordern Sie weitere Unterlagen an.

MASCHINENFABRIK SCHARF GMBH

VERWALTUNG UND WERK: D-59013 HAMM POSTF. 2327
TEL. (02381) 960-01 TELEX 828866 TELEFAX (02381) 960230

SCHARF

WERK HEINITZ D-66520 NEUNKIRCHEN/HEINITZ POSTF. 2034
TEL. (06821) 7940 TELEX 444852 TELEFAX (06821) 79449

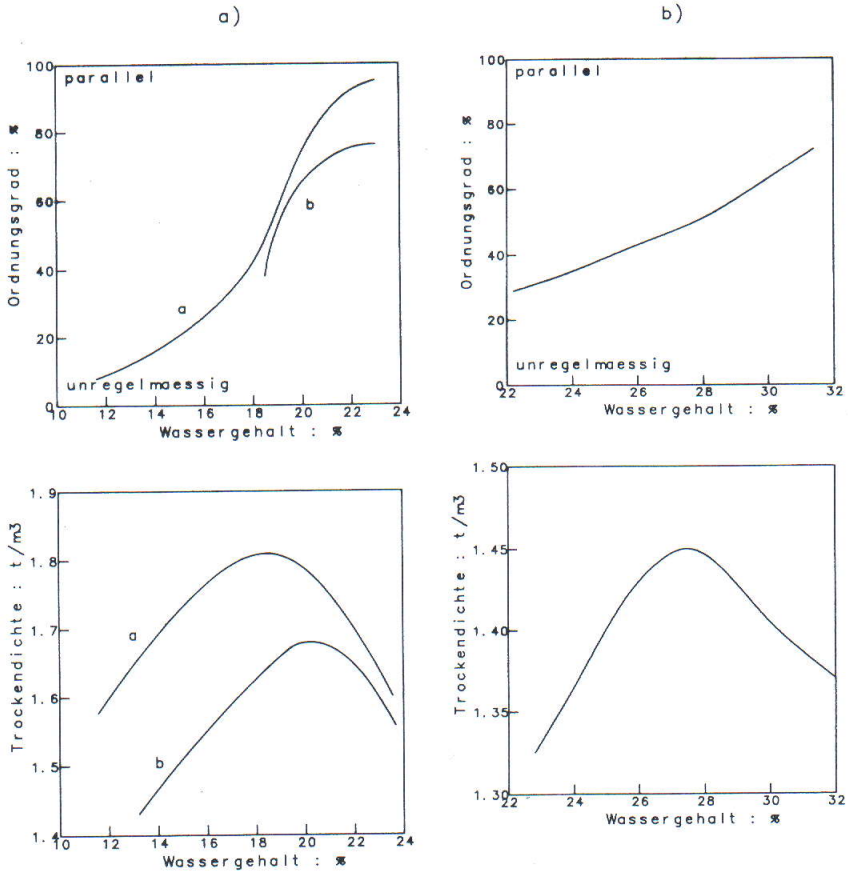


Abb. 3: a) Einfluß der Verdichtung auf die Struktur von Proben aus *Boston Blue Clay* bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten. Nach *Pacey (1956)*.
b) Einfluß der Verdichtung auf die Struktur von Proben aus Kaolinit. Nach *Seed und Chan (1959)*.

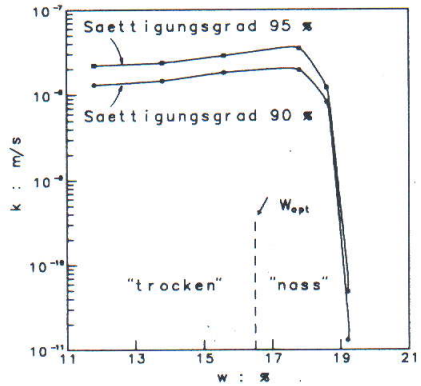


Abb. 4: Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Struktur des Bodens. Nach *Mitchell et al. (1965)*.

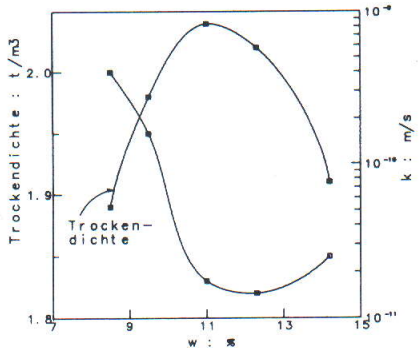


Abb. 5: Änderung der Durchlässigkeit von verdichteten Proben aus Ton. Nach *Lambe (1962)*.

erreicht etwas *nasser* als das Optimum die geringste Durchlässigkeit. Dies kann so erklärt werden, daß der Orientierungsgrad der Teilchen mit zunehmendem Wassergehalt größer wird und damit die Durchflußkanäle im Boden kleiner werden, was jedoch nicht generell so sein muß, wie sich nachfolgend noch zeigen wird. Auf der *nassen* Seite hat die geringere Dichte eine etwas vergrößernde Wirkung auf die Durchlässigkeit.

Aufgrund einer Vielzahl von Untersuchungen an unterschiedlichen feinkörnigen Böden hat sich der tendenzielle Verlauf der Durchlässigkeit auf der *nassen* Seite, so wie er in Abbildung 5 dargestellt ist, bestätigt und die geringste Durchlässigkeit der untersuchten Böden bei einem Wassergehalt etwas *nasser* als das Optimum eingestellt. Für den Verlauf der Durchlässigkeit auf der *trockenen* Seite hat sich hingegen gezeigt, daß dieser in erster Linie eine Funktion der Bodenart darstellt und tendenziell recht unterschiedlich verlaufen kann, siehe hierzu *Lambe (1954), Bjerrum* und *Huder (1957)* und *Mitchell et al. (1965)*.

Neben der Bodenart sind es aber auch die geleistete Verdichtungsarbeit sowie die Art und Weise der Energieübertragung, die den Verlauf der Durchlässigkeit beeinflussen. Abbildung 6 zeigt eine Serie von Proben aus schluffigem Ton, die mit jeweils unterschiedlicher Arbeit verdichtet wurden, wobei die Verdichtung der Proben knetend *(Harvard miniature compaction)* durchgeführt wurde. Es wird deutlich, daß sich die geleistete Verdichtungsarbeit auf die Durchlässigkeit auswirkt, insbesondere auf der *trockenen* Seite.

Wie die bisherigen Darstellungen gezeigt haben, hängt die Durchlässigkeit feinkörniger Böden weitgehend von der Struktur des Bodens ab und erreicht unabhängig von der geleisteten Verdichtungsarbeit etwas *nasser* als das Optimum seinen Kleinstwert. Die Struktur selbst wird wiederum in starkem Maße von den Scherverformungen beeinflußt, denen ein Boden bei der Verdichtung auf der *nassen* Seite ausgesetzt ist. Unterschiedliche Verdichtungsmethoden erzeugen unterschiedlich große Scherverformungen in der Probe, was die Struktur beeinflußt und demzufolge wieder Auswirkungen auf die Durchlässigkeit hat. Zur Beurteilung, inwieweit die Art und Weise der Verdichtung unmittelbar das Durchlässigkeitsverhalten eines Bodens beeinflußt, zeigt Abbildung 7 den Verlauf der Durchlässigkeit von Proben aus schluffigem Ton für eine statische und knetende Art der Verdichtung. Um für den Fall der statischen Verdichtung eine über die Probenhöhe homogene Verdichtung zu erreichen, wurden neben den herkömmlichen Probenabmessungen gedrungene (h/d = 0,4) Probekörper untersucht. Es wird deutlich, daß auf der *trockenen* Seite die Art der Verdichtung einen nur geringen Einfluß hat. Auf der *nassen* Seite hingegen verhalten sich die statisch verdichteten Proben deutlich durchlässiger als die knetend verdichteten Proben. Weitere Ergebnisse von Versuchen, in denen der Einfluß der Verdichtungsart auf die Durchlässigkeit untersucht wurde, wobei neben der statischen und knetenden Art der Verdichtung auch die rammende Verdichtung mit modifizierter Proctordichte ($mod\rho_{Pr}$) eingesetzt wurde, finden sich in *Dunn* und *Mitchell (1984)*.

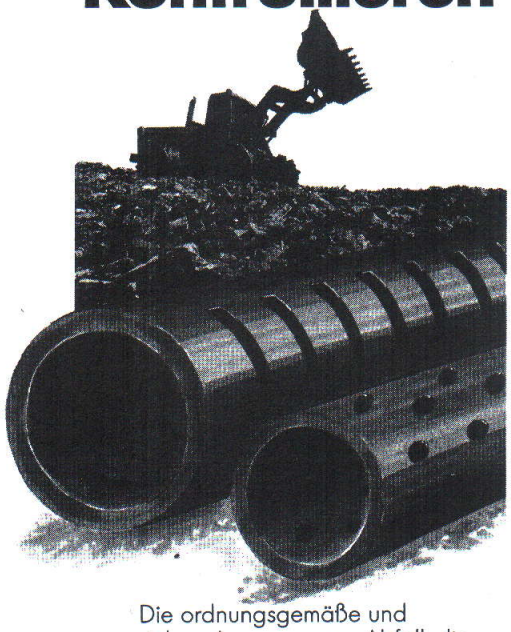
In verdichteten feinkörnigen Böden können je nach Bodenart rheologische Vorgänge stattfinden, die die Eigenschaften wie z. B. die Durchlässigkeit des Bodens merklich beeinflussen. Die Verdichtung solcher thixotroper Böden schafft eine dispergierte Struktur, die wahrscheinlich unmittelbar mit der geleisteten Verdichtungsarbeit zusammenhängt *(Mitchell, 1961)*. Von Natur aus tendieren thixotrope Böden jedoch dazu, eine eher koagulierte Struktur einzunehmen, so daß der Boden nach der Verdichtung versuchen wird, von der ihm aufgezwungenen dispergierten Struktur allmählich in eine koagulierte überzugehen. Diese Entspannung der Struktur des Bodens verursacht eine Zunahme der effektiven Porengröße, die sich unmittelbar im Durchlässigkeitsverhalten widerspiegelt. Versuche von *Mitchell et al. (1965)* an einem schluffigen Ton zeigen je nach Wassergehalt und Sättigungsgrad eine Zunahme der Durchlässigkeit infolge zeitlich verlaufender thixotroper Vorgänge von bis zu einem Faktor 6.

2.3 Einfluß der Verdichtung auf die Scherfestigkeit fein- und gemischtkörniger Böden

Die Scherfestigkeit fein- und gemischtkörniger Böden hängt in starkem Maße von der Art und Weise der Verdichtung ab. Abbildung 8 zeigt für unterschiedliche Verdichtungsmethoden den Verlauf des Spannungsdeviators bei 5 % axialer Probenstauchung aus Scherversuchen an schluffigem Ton. Es zeigt sich, daß die Art der Verdichtung auf der *trockenen* Seite einen nur geringen Einfluß auf die Scherfestigkeit hat, hingegen auf der *nassen* Seite einen doch erheblichen. Die

Deponietechnik

Konzentrieren und Kontrollieren



Die ordnungsgemäße und sichere Lagerung von Abfall, die Neueinrichtung und Sanierung von Deponien, die Beseitigung von Altlasten jeglicher Art...
All das erfordert den Einsatz qualitativ hochwertiger Ausbaumaterialien.
Speziell für Sickerwasserdränagen, für die Gasfassung in Deponien, für Kontrollschächte und Sonderbauwerke haben sich die SBF-Filter- und Vollwandrohre aus PE-HD ausgezeichnet bewährt.
Geeignet für diverse Anwendungsbereiche, beispielsweise Bodenluft-Absaugung, Schadstoffassung, Beobachtungspegel u.a.m., bieten wir für jeden Einsatzbereich die optimale Lösung.
Gern machen wir Sie damit näher bekannt – bitte rufen Sie uns an.

SBF Wasser und Umwelt

Zweigniederlassung der Preussag Anlagenbau GmbH
Moorbeerenweg 1 · 31228 Peine · Telefon (0 51 71) 4 03-0 · Telefax (0 51 71) 4 03-123 · Telex 9 2 670

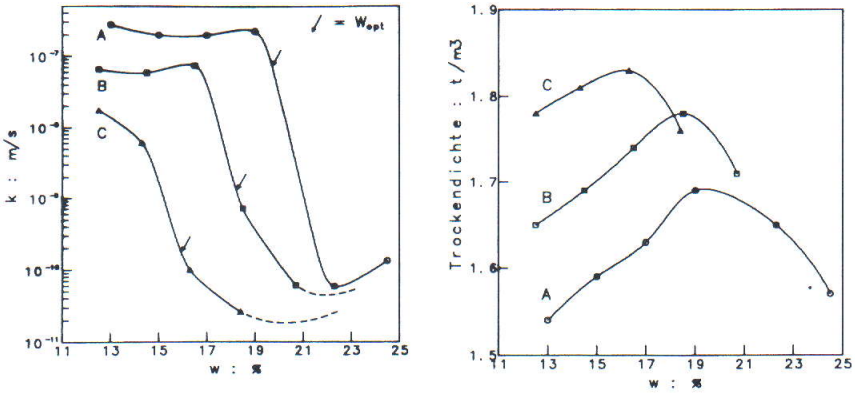


Abb. 6: Durchlässigkeit von mit unterschiedlicher Arbeit verdichteten Proben aus schluffigem Ton. Nach *Mitchell et al. (1965).*

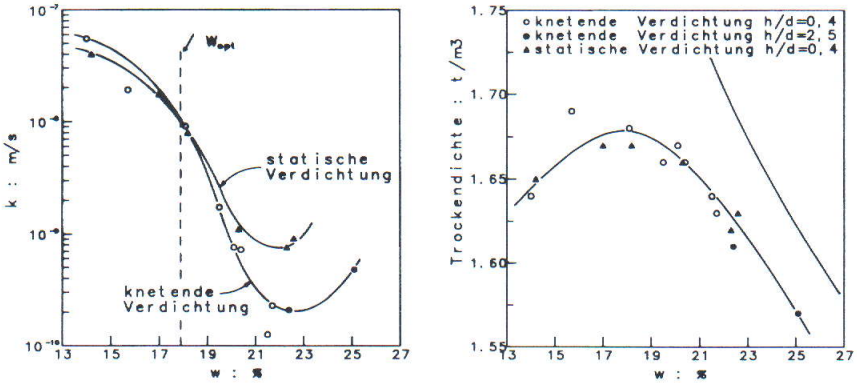


Abb. 7: Einfluß der Verdichtungsart auf die Durchlässigkeit von Proben aus schluffigem Ton. Nach *Mitchell et al. (1965).*

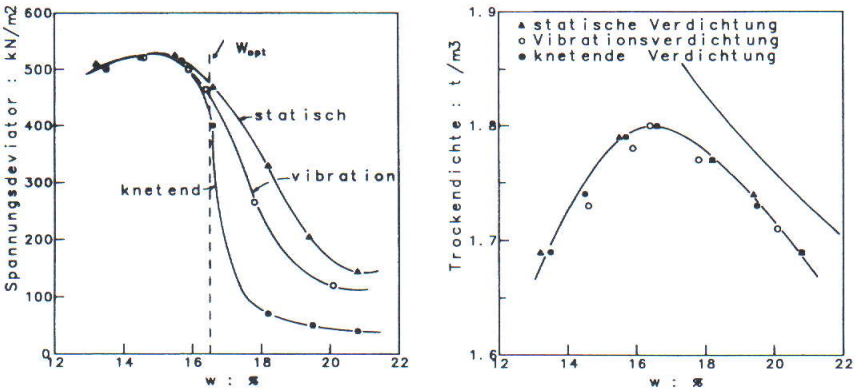


Abb. 8: Einfluß der Verdichtungsmethode auf die Scherfestigkeit eines schluffigen Tons. Nach *Mitchell et al. (1965).*

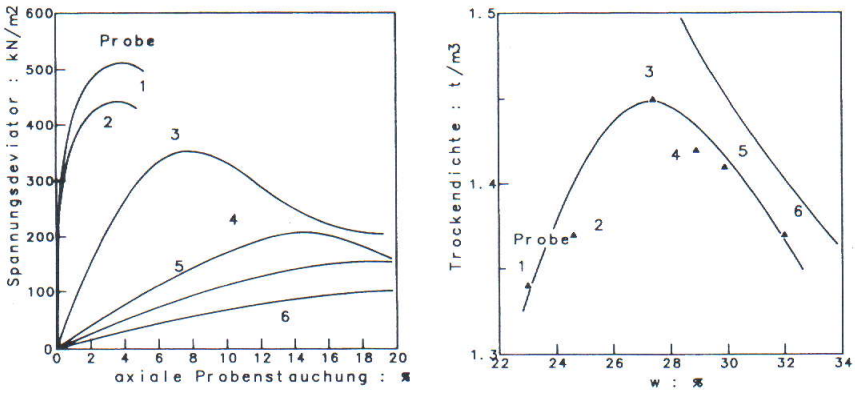


Abb. 9: Scherfestigkeit von Proben aus Kaolinit in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt. Nach *Seed und Chan (1959).*

Scherfestigkeit des Bodens nimmt mit der Reihenfolge statische Verdichtung, Vibrationsverdichtung, knetende Verdichtung ab. Weiterhin zeigt sich, daß die Scherfestigkeit mit Erreichen einer gewissen Trockendichte unabhängig von der Art der Verdichtung abfällt. Das Abfallen der Scherfestigkeit tritt nur bei hohen Sättigungsgraden auf, also bei auf der *nassen* Seite verdichteten Proben, wo die Struktur des Bodens von dispergiert angeordneten Teilchen gebildet wird und durch die Verdichtung Porenwasserdrücke entstehen können. Es läßt sich also auch hieraus erkennen, daß die Verdichtung auf der *trockenen* Seite die Struktur des Bodens nicht ändert, die Verdichtung auf der *nassen* Seite hingegen eine koagulierte Struktur in eine dispergierte überführt. Bei Versuchen mit einer axialen Probenstauchung von 20 % konnte die in Abbildung 8 dargestellte Spannungs-Verformungs-Charakteristik nicht mehr nachgewiesen werden, da die Scherfestigkeit von der Art der Verdichtung weitgehend unbeeinflußt blieb. Dies ist anscheinend darauf zurückzuführen, daß sich die Struktur des Bodens durch die großen Verformungen infolge der axialen Stauchung derart ändert, daß es zwischen der Struktur der *nassen* und *trockenen Proben keinen Unterschied mehr gibt (Kezdi, 1970)*.

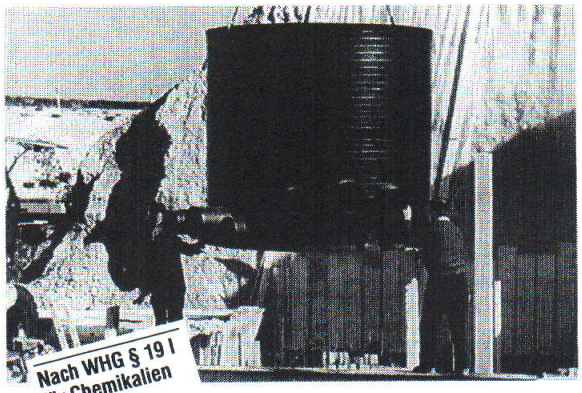
Abbildung 9 verdeutlicht nochmals den Einfluß des Einbauwassergehalts bzw. der Struktur des Bodens auf die Scherfestigkeit. *Trockene* Proben verhalten sich bei größerer Festigkeit spröde, und es ist ein deutlicher Bruch zu erkennen. *Nasse* Proben verhalten sich hingegen bei insgesamt geringerer Festigkeit duktil und lassen keinen ausgeprägten Bruch erkennen.

Wie bereits in Abschnitt 2.2 für das Durchlässigkeitsverhalten aufgezeigt wurde, können rheologische Vorgänge auch das Scherfestigkeitsverhalten feinkörniger Böden beeinflussen. Neben der Neigung thixotroper Böden, nach der Verdichtung allmählich von einer dispergierten Struktur in eine eher koagulierte überzugehen, wie es in Abschnitt 2.2 beschrieben ist, tritt gleichzeitig eine Änderung innerhalb des Porensystems des Bodens ein, da aufgrund von Versuchen beobachtet werden konnte, daß der Porenwasserdruck in Proben mit zunehmendem Alter nach der Verdichtung abnimmt *(Bishop et al., 1960)*. Die beiden genannten Einflüsse lassen den Boden fester werden, wobei der Übergang des Bodens in eine eher koagulierte Struktur auch als thixotrope Verfestigung bezeichnet wird *(Mitchell et al., 1965)*.

2.4 Einfluß der Verdichtung auf die Zusammendrückbarkeit fein- und gemischtkörniger Böden

Die Besonderheit verdichteter fein- und gemischtkörniger Böden, die fast immer ungesättigt sind, ein disperses System (Luft, Wasser und Feststoff) bilden und sich damit der Begriff der effektiven Spannung in der Form $\sigma' = \sigma - u$ i. a. nicht mehr anwenden läßt, wirkt sich auf das Zusammendrückungsverhalten des Bodens aus. Betrachtet man z. B. das Verhalten dreier Proben mit unterschiedlichen Wassergehalten und Trockendichten in einem Kompressionsversuch, so zeigt sich, daß die Proben mit zunehmendem Wassergehalt für eine bestimmte Auflast einer immer größeren Volumenreduzierung unterliegen, wie es qualitativ Abbildung 10 zeigt. Sättigt man die Proben unter Auf-

Sichere Umwelt. Schächte und Doppelmantel-Behälter aus PE-HD.



Nach WHG § 19 I für Chemikalien und Laugen.

- Deponie-Entwässerungs-Systeme
- Deponie-Entgasungs-Systeme
- Deponie-Schächte aus PE-HD
- Stauraum-Kanäle
- Sickerwasser-Behälter
- Großapparate-Bau
- Rohrmontage

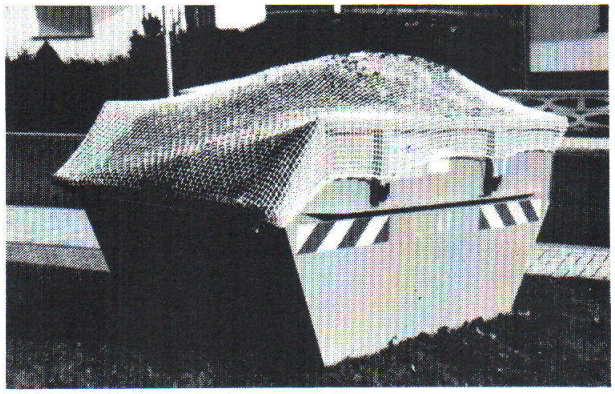
Besprechen Sie mit uns Ihre speziellen technischen Anforderungen. formoplast entwickelt, konstruiert und berechnet computerunterstützt die für Sie wirtschaftliche Lösung.

formoplast
Kunststofftechnik GmbH
Max-Eyth-Straße 30
D-89231 Neu-Ulm

Fax (07 31) 72 32 11
Tel. (07 31) 72 10 88

formoplast
Behälter und Apparate aus Kunststoff

Abdecknetze
für Mulden und Container



Absetzkipper-Zubehörteile
(bitte Prospekte anfordern)

Lothar Huck GmbH
Im Mühlgut 8–10
77815 Bühl-Weitenung

Tel. (0 72 23) 5 20 19
Fax (0 72 23) 53 27

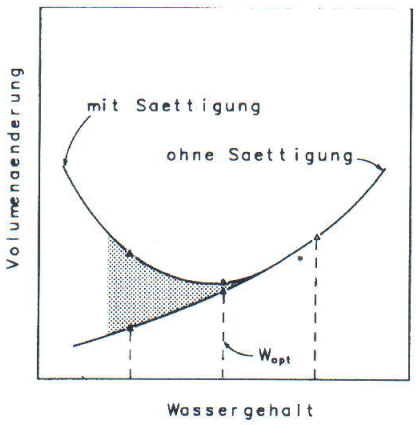


Abb. 10: Volumenänderung eines Bodens mit unterschiedlichen Wassergehalten und Trockendichten bei Sättigung unter Auflast. Nach *Lang und Huder (1990).*

last, so ist zu beobachten, daß die *trockene* Probe eine deutliche Volumenreduzierung erfährt, ohne daß eine zusätzliche Belastung aufgebracht wurde. Dieser Vorgang wird auch als *Sättigungsschock* bezeichnet *(Lang* und *Huder, 1990).*

Hilf (1959) führt die durch einen Sättigungsschock hervorgerufene Volumenänderung unmittelbar auf das Versagen des Bodens durch Überschreiten der Scherfestigkeit zurück, wofür er den Vorgang der Sättigung innerhalb des Scherdiagramms betrachtet. Abbildung 11a zeigt dabei den effektiven Spannungskreis 1, dem ein Boden unter einer gegebenen Auflast und der daraus resultierenden Hauptspannung σ_1' für dränierte Verhältnisse ausgesetzt ist. Der Punkt O repräsentiert dabei den Spannungszustand des Bodens zum Zeitpunkt nach der Verdichtung, jedoch noch vor der Belastung. Unabhängig davon, wie weit sich der Boden unter der Last im Kompressionsversuch nun zusammendrücken läßt, ist die Probe immer gleich weit vom Bruchzustand entfernt. Wird der Boden nun unter dem vorhandenen effektiven Spannungszustand (Spannungskreis 1) gesättigt, nimmt der in dem ungesättigten Boden wirkende Kapillardruck u_c vollständig ab und die effektive Hauptspannung σ_1' nimmt um den Betrag von u_c ab, so daß sich der Spannungszustand 1* in der Probe einstellt und gleichzeitig ein Versagen des Bodens durch Überschreiten der Scherfestigkeit eintritt. Mit der hierbei getroffenen Annahme, daß der wirkende Kapillardruck u_c die effektive Spannung σ_1' erhöht, wird versucht, den Spannungszustand innerhalb des dispersen Systems zu beschreiben, ähnlich wie es mit dem von *Bishop* zur Berücksichtigung der Porenluft in ungesättigten Böden eingeführten χ-Wert versucht wird.

Für den in Abbildung 11b dargestellten Vorgang der Sättigung für eine bei gleicher Trockendichte, jedoch auf der *nassen* Seite eingebauten Probe stellt sich unter genau der gleich großen Auflast wie in Abbildung 11a der Spannungkreis 2 ein, der gegenüber dem Spannungskreis 1 einen kleineren Radius und damit Spannungsdeviator aufweist, vergleiche hierzu Abbildung 9. Ebenso ist der Kapillardruck u_c infolge des höheren Sättigungsgrades weitaus kleiner als zuvor. Verfolgt man den Sättigungsvorgang in Abbildung 11b analog zu Abbildung 11a durch Verschieben des Spannungskreises 2 nach 2*, so tritt kein Versagen des Bodens ein und demnach auch kein *Sättigungsschock*.

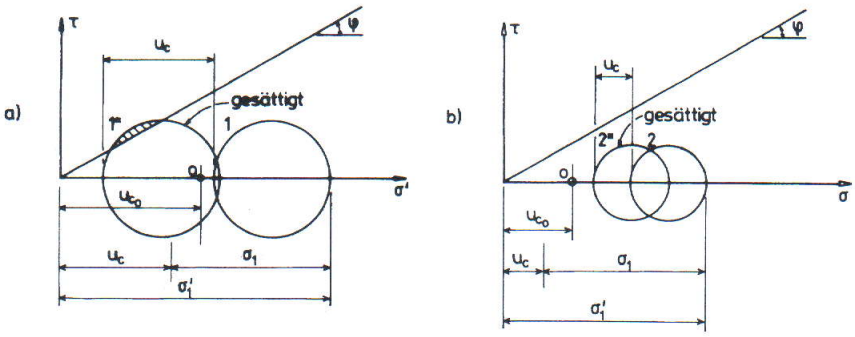


Abb. 11: Änderung des Spannungszustandes infolge Sättigung. a) Trocken eingebauter Boden. b) Naß eingebauter Boden. Nach *Hilf (1991).*

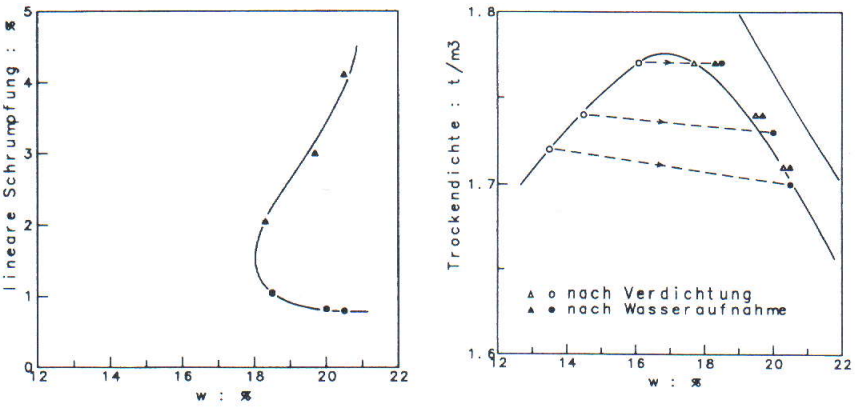


Abb. 12: Lineare Schrumpfung von verdichteten Proben nach Wasseraufnahme. Nach *Kezdi (1970).*

2.5 Einfluß der Verdichtung auf die Schrumpfung fein- und gemischtkörniger Böden

Versuche haben gezeigt, daß je nach thermischer Beanspruchung infolge exothermer Umwandlungsprozesse im Deponiekörper, der Grundwassernähe zur Dichtungsschicht, der kapillaren Saugfähigkeit der geologischen Barriere sowie der Schrumpfneigung der Tonmineralien für Kombinationsdichtungen die Gefahr der Schrumpfrißbildung infolge Austrocknung der mineralischen Dichtungsschicht besteht und damit die Dichtwirkung beeinträchtigt wird *Collins et al., 1988, Holzlöhner, 1988, 1989, 1990, und Brauns et al., 1990).*

Auf der *trockenen* Seite verdichtete fein- und gemischtkörnige Böden schrumpfen deutlich weniger als auf der *nassen* Seite verdichtete, wofür wiederum die Struktur des Bodens ganz entscheidend ist. Vergleicht man z. B. die in Abbildung 12 bei gleichen Wassergehalten und gleicher Dichte, jedoch unterschiedlicher Struktur hergestellten Proben miteinander, so zeigt sich, daß die lineare Schrumpfung der *naß* verdichteten Proben von dispergierter Struktur gegenüber den vor der Wasseraufnahme *trocken* verdichteten Proben deutlich größer ist.

In ähnlicher Weise wie in Abbildung 8 für die Scherfestigkeit und zuvor für das Durchlässigkeitsverhalten ist es neben der Struktur des Bodens auch die Art und Weise der Verdichtung, die die Schrumpfung beeinflußt. Abbildung 13 zeigt für unterschiedliche Verdichtungsmethoden den Verlauf der linearen Schrumpfung an Proben aus schluffigem Ton. Die lineare Schrumpfung nimmt dabei mit der Reihenfolge statische Verdichtung, Vibrationsverdichtung, knetende Verdichtung zu, wobei die Schrumpfung auf der *trockenen* Seite, wie bereits in Abbildung 12 gezeigt, insgesamt deutlich geringer ist als auf der *nassen* Seite.

3. Beurteilungsgrundlagen erdbautechnischer Ausführungen im Rahmen der Qualitätssicherung

Wie die Darstellungen über das bodenmechanische Verhalten verdichteter fein- und gemischtkörniger Böden in Abschnitt 2 gezeigt haben, ist die Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit mineralischer Deponieabdichtungen letztlich ganz entscheidend von der erdbautechnischen Ausführung und den damit erreichten Einbaubedingungen abhängig. Nicht die Einhaltung vorgegebener Zahlenwerte als solche gewährleisten die Dichtigkeit einer mineralischen Abdichtung, sondern vielmehr eine flächenhafte, durch den kontrollierten und gesteuerten Einbau geschaffene, weitgehend homogene, sowohl *innere* als auch *äußere*[3]) Struktur des Erdstoffs. Den Einfluß der *äußeren* Struktur macht der unmittelbare Vergleich des Durchlässigkeitsverhaltens zwischen groß- und kleinmaßstäblichen Laborversuchen an einem feinkörnigen Boden deutlich *(Shackelford und Javed, 1991).* Hierbei wurde ein natürlich gewonnener schluffiger Ton bei insgesamt 4 unterschiedlichen, durch vorverdichtete Erdklumpen hergestellte Fraktionen an sowohl klein- (Proctortopf) als auch großmaßstäblichen (Probenfläche 0,835 m^2, Probenhöhe 15,24 cm) Probenabmessungen Durchlässig-

3 Hinsichtlich der Ungleichförmigkeit der Aggregatsgröße der Erdklumpen.

VOEST-ALPINE
UMWELTTECHNIK GMBH
München • Wolfen • Potsdam

Leistungen auf der Höhe der Zeit

Deponie-Technik
Ingenieurbau
Auffangbecken
Zwischenlager
Bodensanierung

Projektmanagement
Problemlösungen
Entwicklungen
Versuche
Fachtechnische Beratung

80687 München
Elsenheimerstraße 63
Telefon (089) 5 78 35-266
Fax (089) 5 78 35-245

Kunststoff-Dichtungsbahnen
Geotextilien • Geogitter
Kunststoffrohre
Kunststoffschächte

EGUR
Soeben erschienen
EG-UMWELTRECHT
Systematische und ergänzbare Sammlung der Verordnungen, Richtlinien und sonstigen Rechtsakte der Europäischen Union zum Schutz der Umwelt
Von Prof. Dr. Peter-Christoph Storm und Dipl.-VerwW. Siegbert Lohse
1158 Seiten, DIN A 5, DM 248,–/öS 1988,–/sfr. 257,–, einschließlich Spezialordner. Ergänzungen nach Bedarf, Seitenpreis ca. DM 0,32
„... Da eine ordnungsmäßige gewerbliche Tätigkeit ohne Kenntnis der einschlägigen Umweltvorschriften kaum möglich ist und EG-Verordnungen unmittelbar geltendes Recht in den einzelnen Mitgliedstaaten darstellen, ist die vorliegende Loseblattsammlung von beachtlicher Zweckdienlichkeit. Der Adressatenkreis ist weit gesteckt; zu ihm zählen Rechtsanwender in Wirtschaft, Verwaltung und Gerichtsbarkeit."
Dr. Beate Maiwald, München in: GEWERBEARCHIV
ESV
ERICH SCHMIDT VERLAG
Berlin Bielefeld München

keitsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen den Versuchen sind in Tabelle 1 wiedergegeben und belegen, welche Bedeutung auch der *äußeren* Struktur des eingebauten Erdstoffs und deren Auswirkung auf die Durchlässigkeit zukommt.

Tab. 1: Vergleich der Durchlässigkeit zwischen groß- und kleinmaßstäblichen Durchlässigkeitsversuchen. Zahlenwerte nach *Shackelford und Javed* (1991).

Fraktionsgrößen vorverdichteter Erdklumpen	Gemessene Durchlässigkeiten in m/s	
	kleinmaßstäbliche Versuche	großmaßstäbliche Versuche
< 4,75 mm	$1{,}5 \times 10^{-10}$	$2{,}2 \times 10^{-9}$
4,75 bis 25 mm	$2{,}5 \times 10^{-10}$	$6{,}5 \times 10^{-8}$
25 bis 75 mm	$7{,}0 \times 10^{-10}$	$1{,}2 \times 10^{-7}$
< 75 mm	$2{,}5 \times 10^{-9}$	$9{,}2 \times 10^{-9}$

Der erdbautechnischen Ausführung mineralischer Abdichtungen und deren Beurteilung im Rahmen der Qualitätssicherung kommt somit ein bedeutender Stellenwert innerhalb des Gesamtbauwerks Deponie zu, da die mineralische Abdichtung als Ganzes flächenhaft funktionstüchtig sein muß, um eine sichere und umweltverträgliche Abfallentsorgung gewährleisten zu können.

In den für den Deponiebau maßgebenden Vorschriften, Empfehlungen und Merkblättern sind Art und Umfang der Qualitätssicherung festgelegt, die als Teil des Deponieentwurfs in einem Qualitätssicherungsplan aufzustellen sind. Für das Deponieauflager und die mineralischen Abdichtungen, die, wie o. g., neben der Qualität des eingesetzten Erdstoffs in ihrer Funktion wesentlich sind für die Gesamtsicherheit einer Deponie, sind im Rahmen der Qualitätslenkung während der Bauausführung zur Vermeidung von Fehl- (Material-) und Schwachstellen (Herstellungsfehler) mit Hilfe konventioneller Prüfverfahren[4]) im Feld, begleitet durch Laborversuche, im wesentlichen zwei Nachweise zu führen:

- Der Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit des Untergrund- bzw. Unterbau-Planums (Deponieauflager) und
- der Nachweis einer ausreichenden Verdichtung und Durchlässigkeit des Mineral-Planums (Basis- und Oberflächenabdichtung).

4 Die konventionellen erdbautechnischen Prüfverfahren werden im weiteren als bekannt vorausgesetzt.

Als entscheidender Nachteil für die Beurteilung erdbautechnischer Ausführungen und damit der Qualitätssicherung sind hierbei die *punktuell* gewonnenen Prüfergebnisse anzusehen, da über die zwischen den einzelnen Versuchspunkten erreichten Einbaubedingungen keine quantitative Aussage gewonnen wird. Der qualitative Zustand des Deponieauflagers und der mineralischen Abdichtungen zwischen den einzelnen Versuchspunkten kann nur aufgrund einer visuellen Überwachung beim Einbau, wie es die Vorschriften, Empfehlungen und Merkblätter auch vorsehen, vermutet werden. Mögliche Fehl- oder Schwachstellen sind daher nicht vollständig auszuschließen. Über die flächenhafte Beschaffenheit der Struktur einer Deponieabdichtung, die neben den reinen, als Prüfkriterium vorgegebenen Zahlenwerten ganz entscheidend sind für die Wirksamkeit eines Abdichtungssystems, wird mit der herkömmlichen Prüftechnik keine vollständig flächenhafte Kenntnis bzw. Aussagekraft gewonnen. Selbst wenn der Prüfumfang durch Verkleinerung des Prüfrasters erhöht wird, ist noch lange keine vollständig flächendeckende Prüfung erreicht. Weiterhin führen die konventionellen Prüfverfahren aufgrund der verhältnismäßig langen Dauer von der Festlegung der Versuchspunkte und der Versuchsdurchführung über die Auswertung bis hin zur Freigabe der geprüften Flächen zu Verzögerungen im Baubetrieb, behindern die Qualitätslenkung im Rahmen der Qualitätssicherung und stehen der leistungsgerechten Ausführung mit technisch hochwertigen Geräten entgegen.

4. Mögliche Anwendung eines flächendeckenden Prüfverfahrens für eine verbesserte Qualitätssicherung

Seit einigen Jahren ist im Erdbau ein Prüfverfahren in Entwicklung *(Floss et al., 1983, und Floss, 1985)*, das auf der Wechselwirkung zwischen vibrierender Walze des Verdichtungsgerätes und der Steifigkeit des Untergrunds beruht. Dabei wird die dynamische Walze zum kontinuierlich messenden Aufnahmegerät. Das Verfahren wird deshalb als *Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle* (FDVK) bezeichnet.

In Verbindung mit vibrierenden Verdichtungswalzen sind etwa seit dem Jahr 1978 Meßtechniken entwickelt worden, aus denen unterschiedliche firmenspezifische Meßsysteme hervorgegangen sind. Alle Systeme liefern zunächst dimensionslose dynamische Meßwerte,

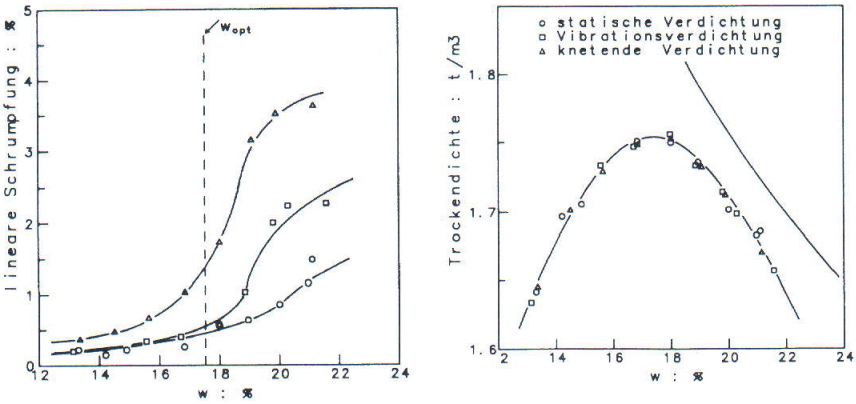


Abb. 13: Einfluß der Verdichtungsmethode auf die Schrumpfung eines schluffigen Tons. Nach *Mitchell et al. (1965)*.

die einer weiteren Interpretation bedürfen. Beim Meßsystem der FDVK wird das zu verdichtende und zu prüfende Planum spurweise abgewalzt und dabei der zeitliche Verlauf durch Meßsignale registriert. Abbildung 14 zeigt die schematische Darstellung einer dynamischen Verdichtungsmeßeinheit und das dazugehörige Meßsignal über die Spurlänge.

Die Weiterverarbeitung der Meßsignale liefert je nach eingesetztem firmenspezifischen Meßsystem einen dynamischen Meßwert. Bei elektronischer Meßwerterfassung kann durch die rechnerunterstützte Weiterverarbeitung der Meßdaten eine flächenhafte Darstellung des erreichten Verdichtungszustandes des gesamten Prüfplanums durch entsprechende grafische Darstellungen erreicht werden.

Der dynamische Meßwert aus der FDVK selbst stellt keine spezifische Bodenkenngröße dar, sondern einen Wert, der in einem bestimmten Zusammenhang zu den üblichen Kenngrößen der Tragfähigkeit (Verformungsmodul) und Verdichtung (Wassergehalt und Trockendichte) steht und für nichtbindige und schwachbindige Böden bereits relativ genau in Korrelation gesetzt werden kann *(Samaras und Spata, 1987; Samaras und Lamm, 1990).* Die Meßwerte stellen ein relatives Maß für die dynamische Steifigkeit des verdichteten Bodens dar und werden von der Kornzusammensetzung, der Dichte sowie mit zunehmendem Feinkornanteil besonders vom Wassergehalt und der Zustandsform beeinflußt. Im Gegensatz zur Dichtemessung wird der Meßwert nicht an einem definierten Bodenvolumen ermittelt, sondern stellt einen repräsentativen Wert über den dynamisch erregten Bodenbereich unter der Walzenbandage dar. Die Einflußtiefe des Meßwertes hängt von der Bandagenbreite, dem Bandagengewicht, der Art der dynamischen Erregung sowie von der Bodenart ab und kann bis zu 1,5 m betragen.

Die Anwendung der FDVK auf fein- und gemischtkörnige Böden, wie sie im Deponiebau verarbeitet werden, stellen im Gegensatz zu den nichtbindigen und schwachbindigen Böden erhöhte Anforderungen an die Interpretation der Meßergebnisse und bedürfen der Verwendung begleitender konventioneller Prüfverfahren. Insbesondere der Wassergehalt und die Zustandsform feinkörniger Böden sowie der Feinkornanteil gemischtkörniger Böden, die ganz entscheidend sind für die Eignung eines Bodens als Deponieabdichtungsmaterial, beeinflussen die Größe des dynamischen Meßwertes. Bei fein- und gemischtkörnigen Böden mit höheren Wassergehalten, eingebaut als das Optimum, wie sie gerade im Hinblick auf die Dichtwirkung ihre günstigste Struktur und Eigenschaften aufweisen, hat sich nach den vorliegenden Erfahrungen aus Versuchsprogrammen und der Baupraxis gezeigt, daß der dynamische Meßwert gegenüber nichtbindigen und schwachbindigen Böden durch das Auftreten von Porenwasserüberdrücken abfällt. Gerade aber diese empfindliche Reaktion der dynamischen Meßwerte bei fein- und gemischtkörnigen Böden ist ein untrüglicher und wertvoller Hinweis zur Beurteilung der erzielten Verdichtung bzw. strukturellen Beschaffenheit sowie teilweise unmittelbar über die zu prüfenden bodenmechanischen Kenngrößen des eingebauten mineralischen Erdstoffs. Dies setzt jedoch einen weitgehend homogenen Erdstoff voraus, wie er i.d.R. im Deponiebau auch eingesetzt wird.

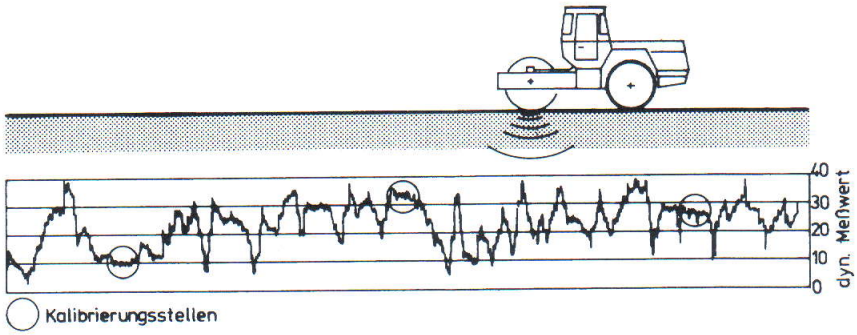


Abb. 14: Darstellung einer dynamischen Verdichtungsmeßfahrt und Prinzip der Kalibrierung durch konventionelle Feldversuche.

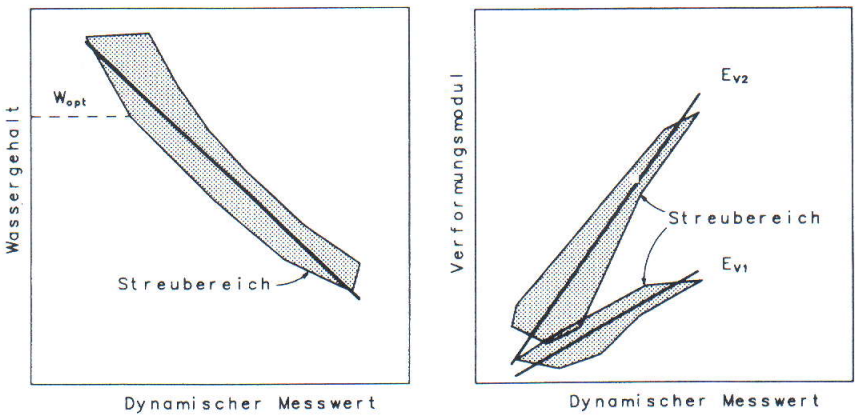


Abb. 15: Abhängigkeit bodenmechanischer Kenngrößen vom dynamischen Meßwert. a) Wassergehalt in Abhängigkeit vom dynamischen Meßwert. b) Verformungsmoduln in Abhängigkeit vom dynamischen Meßwert. Nach *Kempfert und Obermeyer PB. (1991).*

Mit Hilfe der FDVK erscheint es somit möglich, das Deponieauflager und die mineralischen Abdichtungen, in kürzester Zeit flächendeckend zu prüfen und anhand der dynamischen Meßwerte deren Beschaffenheit zügig und lückenlos im Rahmen der Qualitätssicherung zu beurteilen sowie ggf. gezielt, im Bereich möglicher Fehl- oder Schwachstellen punktuell ergänzende konventionelle Prüfungen vorzusehen.

Diese Zielsetzung erfordert für den Einsatz im Deponiebau mit Prüfflächen auf fein- und gemischtkörnigen Böden noch weitere Erfahrungen mit der FDVK. Aufgrund von Ergebnissen der FDVK auf leicht bis mittelplastischen Schluffen und Tonen sowie gemischtkörnigen Böden im sonstigen Erdbau *(Kempfert und Obermeyer PB., 1991)* sind hinsichtlich der relevanten Prüfkenngrößen wie z. B. des Wassergehalts und der Verformungsmoduln auch für die Anwendung im Deponiebau aussagekräftige Ergebnisse mit der FDVK zu erwarten. Hinweise und Erfahrungen zur FDVK finden sich auch in *Floss (1987), Floss (1988)* sowie *Kröber (1987).* Abbildung 15 zeigt festgestellte Korrelationen für fein- und gemischtkörnige Böden, deren quantitative Größen jedoch für jeden Boden im Einzelfall festzulegen sind.

Aufgrund von einer Meßtiefe bei oszillierenden Walzen von ca. 20 bis 30 cm und der daraus resultierenden größeren Homogenität des zu prüfenden Bodenvolumens gegenüber Vibrationswalzen mit einer Meßtiefe bis ca. 1,5 m sind straffe Korrelationen zwischen dem Wassergehalt bzw. der Dichte und des dynamischen Meßwertes zu erwarten. Gerade dieser Walzentyp scheint für den Einsatz im Deponiebau als Prüfwalze aufgrund der geringen Dicken der Einbaulagen des Erdstoffs von Vorteil zu sein.

5. Leistungsfähigkeit der Qualitätslenkung während der Bauausführung

Die in Abschnitt 2 dargestellten Zusammenhänge über das bodenmechanische Verhalten verdichteter mineralischer Erdstoffe, dessen Verständnis grundlegend ist zur Ausführung qualitativ hochwertiger Erdbauwerke im Deponiebau, lassen erkennen, daß 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* ist. Tabelle 2 enthält hierzu nochmals in Form einer kurzen Übersicht die günstigste Lage der Einbauwassergehalte hinsichtlich der in Abschnitt 2 aufgezeigten Einflüsse der Verdichtung auf die einzelnen dargestellten Eigenschaften. Unter Abwägung der Vor- und Nachteile erscheint dabei die Forderung eines maximalen Luftporengehalts von $n_a \leq 5\,\%$[5]) als ein zusätzliches Verdichtungskriterium als äußerst sinnvoll.

Tab. 2: Günstigste Lage des Einbauwassergehalts für unterschiedliche bodenmechanische Eigenschaften.

bodenmechanische Eigenschaften	günstigste Lage des Einbauwassergehalts	Bemerkung
innere Struktur	$> w_{opt}$	günstigste Struktur
Durchlässigkeit	$> w_{opt}$	geringste Durchlässigkeit
Scherfestigkeit	$< w_{opt}$	größerer Spannungsdeviator möglich
Zusammendrückbarkeit	$> w_{opt}$	wegen möglichem Sättigungsschock
Schrumpfverhalten	$< w_{opt}$	günstigste Struktur

Wie bereits in Abschnitt 3 angesprochen, stellen die im Rahmen der Qualitätssicherung durchzuführenden Felduntersuchungen zur Beurteilung der erdbautechnischen Ausführungen mit einem Mindestprüfumfang der Prüfpunkte alle 1000 m^2 bzw. im Raster von 30 x 30 m[6]) nur punktuell gewonnene Prüfergebnisse dar. Dieser Prüfumfang bzw. diese Beurteilungsgrundlage ist angesichts möglicher erdbautechnisch nicht erreichter Vorgaben zwischen den einzelnen Versuchspunkten und deren Auswirkungen auf die in Tabelle 2 genannten bodenmechanischen Eigenschaften und damit letztlich auf die Funktionstüchtigkeit mineralischer Abdichtungen nicht umfassend genug. Die Gefahr möglicher, nicht erkannter Fehl- oder Schwachstellen bleibt gegeben.

Unter der notwendigen Vorgabe einer möglichst flächendeckenden und damit in sich geschlossenen Beurteilung der Qualität erdbautechnischer Ausführungen wird deutlich, daß bei entsprechend gezieltem Einsatz und einem sich ergebenden weiteren Erkenntnisfortschritt, insbesondere bei der Anwendung auf fein- und gemischtkörnigen Böden, die FDVK als Ergänzung zum bisherigen Prüfumfang von Felduntersuchungen die Leistungsfähigkeit der Qualitätslenkung während der Bauausführung im Hinblick auf eine verbesserte Qualität insgesamt steigern könnte und damit einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Gesamtsicherheit von Deponien leisten kann.

Die Verfasser erhoffen sich vor allem aus den dargestellten Zusammenhängen über das bodenmechanische Verhalten verdichteter mineralischer Erdstoffe, daß bei den am Gesamtbauwerk Deponie Beteiligten, insbesondere bei den Ausführenden, eine erhöhte Einsicht in die Notwendigkeit einer gezielten erdbautechnischen Umsetzung bestimmter Vorgaben weiter wächst und das Qualitätsniveau hierdurch insgesamt gesteigert werden kann. Des weiteren sollte zunehmend der Einsatz der FDVK zur Qualitätslenkung während der Bauausführung als fester Bestandteil und Ergänzung zum bisherigen Prüfumfang im Rahmen der Qualitätssicherung angestrebt werden.

6. Zusammenfassung

Für eine sichere und umweltverträgliche Abfallentsorgung ist die Qualtität der Ausführungen mineralischer Abdichtungen im Deponiebau ganz entscheidend. Neben dem Verständnis der Zusammenhänge über das bodenmechanische Verhalten verdichteter mineralischer Erdstoffe, das grundlegend ist zur Ausführung einer hochwertigen Qualität, ist es die gezielte erdbau-

5 Nach der TA Abfall (Anhang E) und des Richtlinienentwurfs Nr. 15 – Mineralische Deponieabdichtung – vom Landesamt für Wasser und Abfall NRW.

6 Entsprechend den maßgebenden Vorschriften, Empfehlungen und Merkblättern.

technische Umsetzung bestimmter Vorgaben und nicht die Einhaltung vorgegebener Zahlenwerte als solches, die das Sicherheitsniveau einer mineralischen Abdichtung ausmachen, was eingehend aufgezeigt wird.

Die Beurteilung erdbautechnischer Ausführungen auf der Grundlage der derzeitigen Art und Umfang von Felduntersuchungen sollte weiter verbessert werden. Erst durch die flächenhafte Kenntnis der Beschaffenheit eines Planums ist die Qualität erdbautechnischer Ausführungen abgesichert zu beurteilen. Eine solche geschlossene Beurteilung erscheint als Ergänzung zum bisherigen Prüfumfang durch den zunehmenden Einsatz der FDVK möglich. Dies zeigen erste dargestellte Erfahrungen an fein- und gemischtkörnigen Böden.

Literatur:

Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., Donald, I. B. (1960): Factors affecting the Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. ASCE Research Conf. on the Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado, pp. 503–532.

Bjerrum, L., Huder, J. (1957): Measurement of the Permeability of Compacted Clays. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, pp. 6–10.

Brauns, J., C. Dittmar, K.-M. Gottheil (1990): Laborversuche zum Feuchthalten thermisch belasteter Kombinationsabdichtungen. Geotechnik 13, S. 135–141.

Collins, H.-J., Spillmann, P., Hermansen, B. (1988): Ist eine Folie auf einer mineralischen Deponieabdichtung vertretbar? Müll und Abfall, Heft 8, S. 362–364.

Daniel, D. E. (1981): Problems in Predicting the Permeability of Compacted Clay Liners. Proceedings of the 4th Symposium on Uranium Mill Tailings Management. Colorado State University, pp. 665–675.

Dunn, R. J., Mitchell, J. K. (1984): Fluid Conductivity Testing of fine-grained Soils. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, Vol. 110, No. 11, Proc. Paper 4392, November.

Floss, R., Gruber, N., Obermayer, J. (1983): A dynamical test method for continuous compaction control. Proc. Improvement of ground, Vol. 1, pp. 25–30, Helsinki.

Floss, R. (1985): Dynamische Verdichtungskontrolle bei Erdbauten. Straße und Autobahn 2.

Floss, R. (1987): NBS Mannheim–Stuttgart, Planfeststellungsbereich 7a, Versuchsfelder Bindige Böden. Bericht zur FDVK (unveröffentl.).

Floss, R. (1988): NBS Mannheim–Stuttgart, Planfeststellungsbereich 7a, Versuchsfelder Bindige Böden. Oszillierendes Verdichtungs- und Meßsystem. Bericht zur FDVK (unveröffentl.).

Hilf, J. W. (1956): An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils. Technical Memorandum 654, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

Hilf, J. W. (1991): Compacted Fill. Chapter 8 of Foundation Engineering Handbook. H.-Y. Fang (ed.). Van Nostrand Reinhold, New York.

Holzlöhner, U. (1988): Das Feuchthalten mineralischer Schichten in der Basisabdichtung von Deponien. Müll und Abfall, Heft 7, S. 295–302.

Holzlöhner, U. (1989): Moisture Behaviour of Soil Liners and Subsoil beneath Landfills. 2nd International Landfill Symposium, Porto Conte, Sardinia.

Holzlöhner, U. (1990): Zur Austrocknung mineralischer Dichtungsschichten in Kombinationsdichtungen, in: Fortschritte der Deponietechnik, Band 36, S. 281–303. Hrsg. Fehlau/Stief, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Kempfert, H.-G., Obermeyer, PB. (1991): Erfahrungsbericht über den Einsatz der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) zur Prüfung von Erdbauwerken bei der DB. Teil 2: Anwendung bei fein- und gemischtkörnigen Böden (unveröffentl.).

Kezdi, A. (1970): Handbuch der Bodenmechanik. Band II – Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Kröber, W. (1987): Dynamische Verdichtungsprüfung von schwach bindigen Böden. Tiefbau-BG 5, S. 301–306.

Lang, H. J., Huder, J. (1990): Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Lambe, T. W. (1954): The Permeability of Compacted Fine-Grained Soils. Special Technical Publication No. 163, ATSM, pp. 56–67.

Lambe, T. W. (1958): The Engineering Behavior of Compacted Clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 84, No. SM 2, Proc. Paper 1655, May.

Lambe, T. W. (1962): Soil Stabilisation. Chapter 4 of Foundation Engineering. G. A. Leonards (ed.). McGraw-Hill, New York.

Mitchell, J. K. (1956): The Importance of Structure to the Engineering Behavior of Clay. Sc. D. Thesis, M. I. T.

Mitchell, J. K. (1961): Fundamental Aspects of Thixotropy in Soils. Transactions, ASCE, Vol. 126, pp. 1586–1626.

Mitchell, J. K., Hopper, D. R., Campanella, R. G. (1965): Permeability of Compacted Clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 91, No. SM 4, Proc. Paper 4392, July.

Pacey, J. (1956): The Structure of Compacted Soils. S. M. Thesis, M. I. T.

Samaras, A., Spata, G. (1987): Neubaustrecke Mannheim–Stuttgart: Qualitätsverbesserung im Erdbau mit der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle – Versuche und Anwendungen –. Die Bundesbahn 5, S. 465–471.

Samaras, A., Lamm, R. (1990): Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK). Straße und Tiefbau 44/6, S. 13–21.

Shackelford, C. D., Javed, F. (1991): Large-Scale Laboratory Permeability Testing of a Compacted Clay Soil. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 2, June, pp. 171–179.

Seed, H. B., Chan, C. K. (1959): Structur and Strength Characteristics of Compacted Clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 85, No. SM 5, Proc. Paper 2216, October.

Turnbull, W. J. (1950): Compaction and Strength Tests on Soil. Presented at Annual Meeting ASCE (January).

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Fachhochschule Konstanz, Brauneggerstraße 55, 78462 Konstanz, Tel. (0 75 31) 6 61 28, Fax (0 75 31) 6 77 06

Dipl.-Ing. (FH) M. Stadel, Kempfert + Partner, Ingenieurbüro für Baugrund, Geotechnik und Umweltschutz, Max-Stromeyer-Str. 1, 78467 Konstanz, Tel. (0 75 31) 6 46 14, Fax (0 75 31) 6 77 06

Zur Person der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert: nach umfangreicher Praxistätigkeit ab 1987 Professor und Leiter des SG Geotechnik, Öffentl. Prüfstelle FH Konstanz; Mitinhaber des Ingenieurbüros Kempfert + Partner, Konstanz; Mitglied in mehreren Fach- und Normenausschüssen.

Dipl.-Ing. (FH) M. Stadel: Diplom 1988; danach Mitarbeiter im Labor Geotechnik, FH Konstanz; ab 1992 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Kempfert + Partner, Konstanz.