



Einfluß von großen hydraulischen Gradienten auf die Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten bei gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden

Hans-Georg Kempfert, Elfriede Ott und Jana Mickley

1 Einleitung

Die Überprüfung der Durchlässigkeit nach *DIN 18 130* bereits während der Herstellung mineralischer Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien, liefert einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung und damit zur Langzeitbeständigkeit der Abdichtung. Eine Qualitätslenkung innerhalb des Bauprozesses setzt aber auch schnelle und zuverlässige Prüfergebnisse in situ und im Labor voraus. In den für den Deponiebau maßgebenden Richtlinien und Vorschriften werden derzeit Durchlässigkeitsprüfungen mit einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$ mit der Begründung empfohlen, daß durch höhere Gradienten die Struktur der Probe zerstört wird. Aufgrund des hohen Zeitaufwandes sind diese Empfehlungen als Qualitätslenkungskriterium im o.g. Sinne kaum anwendbar, sondern stellen eher eine Dokumentation der erreichten Werte im nachhinein dar.

Durch umfangreiche Untersuchungen an verschiedenen Erdstoffen ist der Einfluß des Gradienten auf die Durchlässigkeit untersucht worden. Da die Prüfung der Durchlässigkeit von vielen Faktoren wie z.B. dem verwendeten Prüfgerät, der Einbaudichte mit dem dazugehörigen Wassergehalt, dem Sättigungsgrad, der Korngrößenverteilung u.a. beeinflusst wird, wurden verschiedene Versuchsreihen unter Berücksichtigung dieser Einflüsse durchgeführt. Im Vordergrund stand dabei die Entwicklung einer Beziehung zwischen der Korngrößenverteilung eines Erdstoffes und des maximal möglichen Gradienten, der keinen Einfluß auf die Größe des k -Wertes hat. Es erfolgten Untersuchungen an feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden, die an unterschiedlichen Geräten mit unterschiedlichen Einbaudichten hergestellt wurden. Weiterhin wurde der Einfluß des Sättigungsdruckes auf den Durchlässigkeitsbeiwert geprüft. Ergebnisse aus der Literatur wurden in die Bewertung mit einbezogen.

Beiträge aus der Umweltgeotechnik

Heft 9

März 2001

2 Einfluß des hydraulischen Gradienten auf die Strömung im Boden

2.1 Gesetz von Darcy und Strömungsbereiche

Bekanntlich wird bei Strömungen im Boden das Gesetz von Darcy für die Filtergeschwindigkeit v aus dem Produkt des Durchlässigkeitsbeiwertes k und dem hydraulischen Gefälle i zugrunde gelegt

$$v = k \cdot i \quad \text{in} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]. \quad (2.1)$$

Gleichung (2.1) gilt nur für laminare Strömung, Strukturbeständigkeit und Volumenkonstanz der Probe sowie für eine konstante Beschaffenheit des durchströmenden Fluids. Um die Durchströmung durch Luftschlüsse und durch auftretende Kapillarkräfte nicht zu behindern, muß der Boden wassergesättigt sein, *Gabener (1983)*.

Neben dem linearen Bereich (Darcy) wird in strömungslosen, prälinearen, postlinearen sowie turbulenten Bereich unterschieden. Im linearen Bereich steigt mit wachsendem hydraulischen Gefälle die Fließgeschwindigkeit. Bei feinkörnigen, bindigen Böden ist z.B. der lineare Bereich erst vorhanden, wenn der Übergangsgradient i_e erreicht wird, der den Übergang vom prälinearen zum linearen Bereich bildet. Der Gradient i_e stellt den Übergang zwischen dem linearen und dem postlinearen Bereich dar, bei dessen Überschreitung in grobkörnigen Böden turbulente Strömung auftritt, *Hardt (1985)*.

Die im Deponiebau verwendeten feinkörnigen, bindigen Böden weisen bei der Durchströmung mit kleinen hydraulischen Gradienten kein lineares Verhalten zwischen dem Gradienten i und der Filtergeschwindigkeit v auf. Der Grund dieses Verhaltens sind die elektromolekularen Anziehungskräfte des an die Bodenteilchen gebundenen Wassers, das eine Behinderung der Strömung durch die Porenkanäle zur Folge hat. In *Gabener (1986)* wird der Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gefälle bei kleinen Gradienten aufgezeigt. Der dort dargestellte prälineare Bereich wird im allgemeinen durch eine Parabel beschrieben, die sich dann bei dem Übergangsgradienten i_e an die Gerade $v = k \cdot (i - i_e)$ anschließt. Dabei wird der Gradient i_0 , der sogenannte Anfangsgradient, durch Extrapolation aus dem Verlauf der Gerade im linearen Strömungsbereich bestimmt. Der Parabelverlauf nach *Hansbo* beginnt im Koordinatenursprung, wohingegen der Parabelverlauf nach *Kézdi (1970)* erst ab einem Gradienten $i = i_0$, dem Schwellenwert, beginnt. Für ein Druckgefälle $i \leq i_0$ sind keine Wasserbewegungen im Boden vorhanden. Bei Tonen mit Durchlässigkeitsbeiwerten im Bereich zwischen $4,7 \cdot 10^{-9}$ m/s und $2,2 \cdot 10^{-11}$ m/s treten keine strömungslosen Bereiche auf,

für Böden mit k -Werten $\leq 10^{-12}$ m/s kann dies jedoch aufgrund der meßtechnischen Randbedingungen nicht völlig ausgeschlossen werden, siehe *Gabener (1986)*.

2.2 Durchlässigkeitsverhalten bei großem hydraulischen Gefälle

Eine Abgrenzung zwischen laminarer und turbulenter Strömung hat *Ohde (1956)* getroffen. Danach herrscht laminare Strömung, wenn Gleichung (2.2) gilt

$$i < \frac{0,1}{d_w^3} = i_{gr} \quad (2.2)$$

mit d_w = wirksamer Korndurchmesser, der in der Regel $d_{10} < d_w < d_{40}$.

Der Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Gradienten und dem wirksamen Korndurchmesser nach Gleichung (2.2) wird in Bild. 2.1 deutlich. In anderer Literatur wird bei bindigen Böden keine Abgrenzung des Gradienten zwischen linearem und turbulentem Bereich getroffen, da nach *Hardt (1985)* und *Horst (1997)* turbulente Strömung niemals erreicht werden kann.

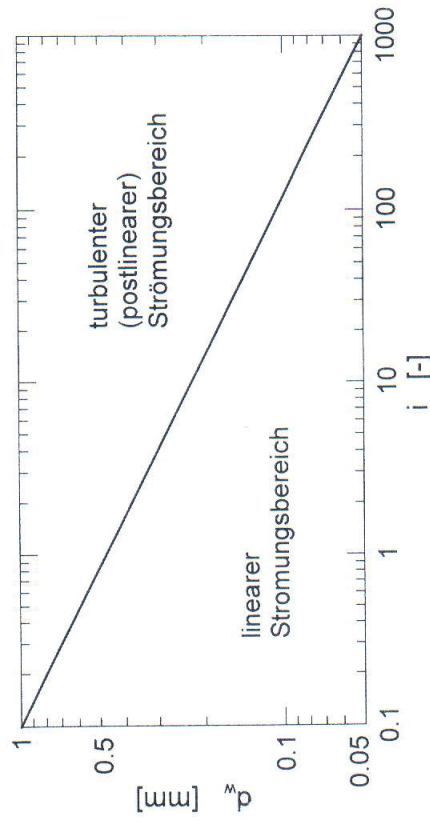


Bild 2.1: Abgrenzung zwischen linearem und turbulentem Strömungsbereich, nach *Ohde (1956)*

Horst (1997) führte an einem Ton Versuche mit Gradienten bis $i = 500$ durch, siehe Bild 2.2. Bei diesen Untersuchungen wurden insgesamt 6 Bodenproben bei gleichen Bedingungen eingebaut und mit unterschiedlichen Gradienten durchströmt. Die aufgeführten Gradienten von

$i = 10$ bis $i = 500$ zeigten mit zwei Ausnahmen einen konstanten Verlauf, was bedeutet, daß der Einfluß des Gradienten an den untersuchten Proben vernachlässigbar ist. Die Versuche mit höheren Gradienten lieferten sogar gleichmäßigere Ergebnisse. Horst (1997) empfiehlt deshalb, Wasserdurchlässigkeitsprüfungen im Labor bei einem Gradienten von $i = 100$ durchzuführen. Dunn/Mitchell (1984) untersuchten an zwei verschiedenen schluffigen Tonen den hydraulischen Gradienten, der stufenweise von $i = 20$ auf $i = 200$ erhöht und danach wieder verringert wurde. Dabei wurde festgestellt, daß der k -Wert mit steigendem Gradienten abnahm; bei der Verringerung des Gradienten konnte jedoch keine Zunahme der Durchlässigkeit festgestellt werden. Dunn/Mitchell (1984), Horst (1997). In Reuter (1988) ist das Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren untersucht worden. Um einen häufigen Austausch der Porenflüssigkeit mit der Prüfflüssigkeit zu ermöglichen, wurden Versuche mit Gradienten von $i = 167$ bis $i = 667$ durchgeführt. Dabei konnten keine Abweichungen vom Darcy'schen Gesetz festgestellt werden, Reuter (1988), was von Horst (1997) bestätigt wurde.

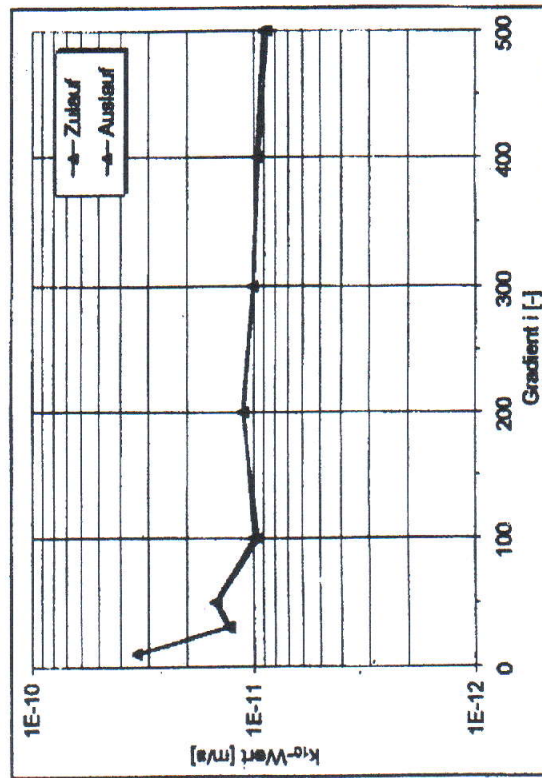


Bild 2.2: Abhängigkeit des k - Wertes vom Gradienten verschiedener Proben eines Tones, nach Horst (1997)

3 Eigene Untersuchungen

3.1 Randbedingungen

Zur Bestimmung der Durchlässigkeit wurden 8 Versuchsreihen (VR I bis VR VIII) mit insgesamt 26 Probekörpern durchgeführt. Die Versuchsreihen unterschieden sich hinsichtlich der Bodenart, der Einbaubedingungen und der Versuchsanordnung, siehe Tabelle 3.1, wobei sowohl feinkörnige als auch gemischtkörnige Böden geprüft wurden.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung Versuchsreihen und der zugehörigen Randbedingungen

Versuchsreihe (VR)	Bodenart	Einbaubedingung Körnungslinie	Anzahl der Probekörper	Versuchsklasse (VK) nach DIN 18130-1
I	Ton	$D_{pr} = 0,97$ auf der nassen Seite	3	1a
II	Ton-Schluffstein		3	3
III	Sand und Kaolin Gemisch (10:1)	Bild 3.1	3	1a
IV	toniger Schluff	$D_{pr} = 0,97$ auf der trockenen Seite	1	2
V	Sand- Schluffgemisch V_a $U=56$ V_b $U=19$		2	2
VI	Geschiebelehm $U=100$	Bild 3.5	4	2
VII	toniger Schluff	$D_{pr} = 0,97$ auf der trockenen Seite	2	2
VIII	Stark schluffiger Sand, schwach kiesig VIIIb $U=32$		Bild 3.7	2

Die Unterteilung der Böden nach den Einbaubedingungen auf der nassen bzw. der trockenen Seite der Proctorkurve soll grundsätzliche, strukturbedingte Unterschiede im Durchlässigkeitsverhalten von Böden aufzeigen. VR I bis III wurden bei $D_{pr} = 0,97$ auf der nassen Seite und im Vergleich dazu VR IV bis VIII bei $D_{pr} = 0,97$ auf der trockenen Seite der Proctorkurve eingebaut.

Weiterhin erfolgte die Durchlässigkeitsbestimmung mit drei unterschiedlichen Versuchsanordnungen:

- Anlage mit veränderlichem i (VK 1a k_{10} -Anlage, mit Sättigungsdruck);
- Anlage mit $i = \text{constant}$ (VK 3 Braunschweiger Zelle);
- Anlage mit $i = \text{constant}$ (VK 2 nach Ruppert/Stiriz).

Zur Versuchsdurchführung wurden die Bodenproben von unten nach oben mit entlüftetem und entmineralisiertem Wasser durchströmt.

3.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

3.2.1 Ergebnisse der Proben auf der nassen Seite

Die Betrachtungen des Durchlässigkeitsverhaltens auf der nassen Seite erfolgten an den Probenkörpern der VR I bis III, deren Korngrößenverteilungen Bild 3.1 dargestellt sind. Es wurden Proben aus Ton, VR I, Ton-Schluffstein, VR II und ein Sand-Kaolin-Gemisch im Verhältnis 10:1, VR III untersucht, siehe Bild 3.1. Es sind nur die Korngrößenverteilungen des Sandes dargestellt. VR I und II wurden sowohl in die k_{10} -Anlage (VK 1a) als auch in die Braunschweiger Zellen (VK 3) eingebaut. Das Sand-Kaolin-Gemisch verhielt sich bei der Durchlässigkeitsprüfung nicht stabil und wurde von allen weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

In den Bildern 3.2 und 3.3 sind die ermittelten k -Werte in Abhängigkeit von variierenden Gradienten bis $i = 500$ dargestellt. Das Durchlässigkeitsverhalten der VR I und II bei Prüfung in der k_{10} -Anlage, siehe Bild 3.2, zeigt weitgehend konstante Werte bis zu einem bestimmten, von der Bodenart abhängigen, Gradienten. Dieser wurde für VR I mit $i = 300$ bestimmt, wohingegen bei VR II nur ein Gradient von $i = 200$ aufgebracht werden konnte, ohne daß ein Einfluß auf die Größe des k -Wertes vorlag. Daraus kann gefolgert werden, daß erwartungsgemäß bei den feinkörnigeren Proben der maximal mögliche Gradient, der die Größe des k -Wertes nicht beeinflusst, größer ist als bei gemischtkörnigen Böden.

Bild 3.3 zeigt die Ergebnisse bei Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte von Tonproben mittels unterschiedlicher Versuchsanordnungen. Dabei wurde VR I, in der k_{10} -Anlage (VK 1a) mit beidseitigem Sättigungsdruck von 3,0 bar und im Vergleich dazu in den Braunschweiger Zellen (VK 3) ohne Sättigungsdruck untersucht. Bei den Tonproben der Braunschweiger Zellen, VR I / VK 3, stellte sich eine deutliche Verringerung des k -Wertes bis zu einem Gradienten von $i = 150$ ein, der danach wieder auf das Anfangsniveau anstieg. Dieses Verhalten wird auf unvollständige Wassersättigung der Proben bei Versuchsbeginn zurückgeführt. Die vorhandenen Luftfeinschlüsse in den Bodenproben verringern die zum Durchfluß zur Verfügung stehende Porenquerschnittsfläche, siehe auch *Simons/Reuter (1985)*. Nach Eintreten der Sättigung, sind die Durchlässigkeitsbeiwerte beider Anlagen miteinander vergleichbar. Daraus folgt, daß der aufgebrachte Sättigungsdruck der Proben aus der k_{10} -Anlage keinen negativen Einfluß auf den Durchlässigkeitsbeiwert hat und sich aus beiden Anlagen gleiche k -Werte bestimmen lassen, sofern vollständige Wassersättigung der Proben erreicht wird.

In Bild 3.4 erfolgt die vergleichsweise Darstellung von Durchlässigkeitsmessungen der VR I bei $i = 30, 135$ und 400. Bei einem Gradienten $i = 30$ werden große Abweichungen der Einzelmessungen vom Mittelwert festgestellt, wohingegen sich ein sehr gleichmäßiger Verlauf des k -Wertes bei $i = 135$ ergab. Ab dem Gradienten $i = 400$ ist sowohl die Erhöhung des Durchlässigkeitsbeiwertes auch der Streuung der Meßergebnisse zu verzeichnen, was ebenfalls von *Horst (1997)* festgestellt wurde.

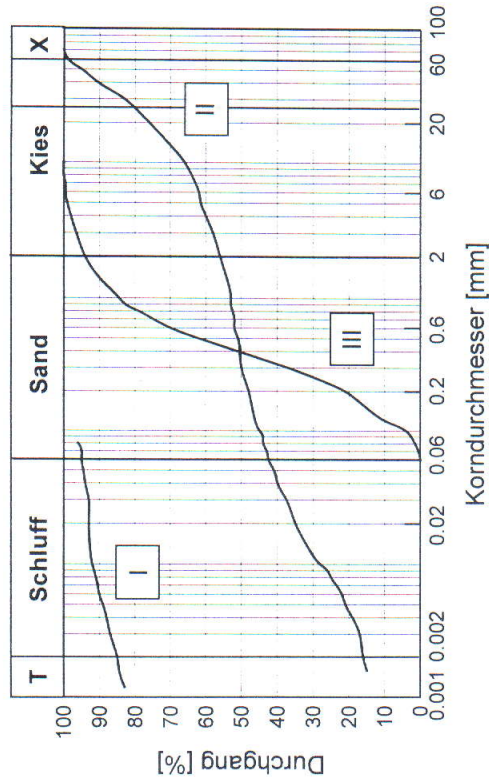


Bild 3.1: Körnungslinien von Ton (VR I), Ton-Schluffstein (VR II) und vom Sand (VR III)

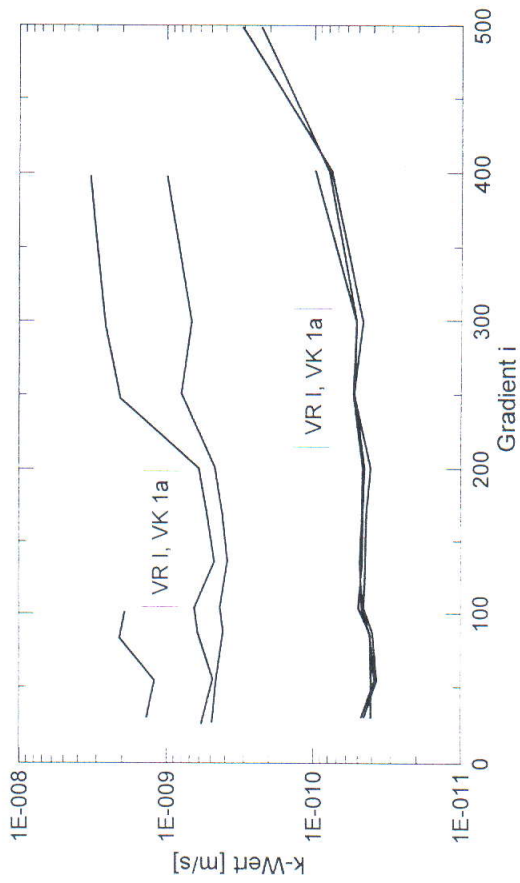


Bild 3.2: k- Werte von Ton VR I und Ton-Schluffstein VR II in Abhängigkeit vom Gradienten i

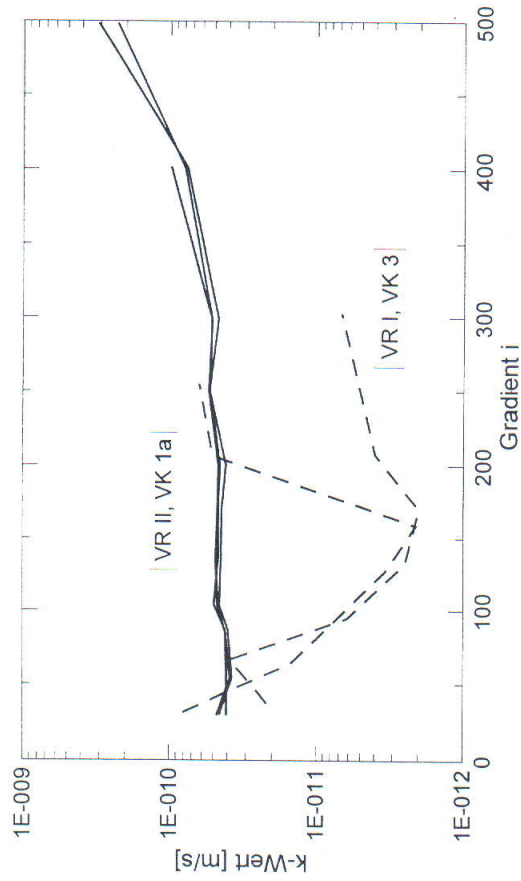


Bild 3.3: k- Werte der Tonproben aus der k_{10} -Anlage (VR I, VK 1a) und den Braunschweiger Zellen (VR I/VK 3) in Abhängigkeit vom Gradienten i

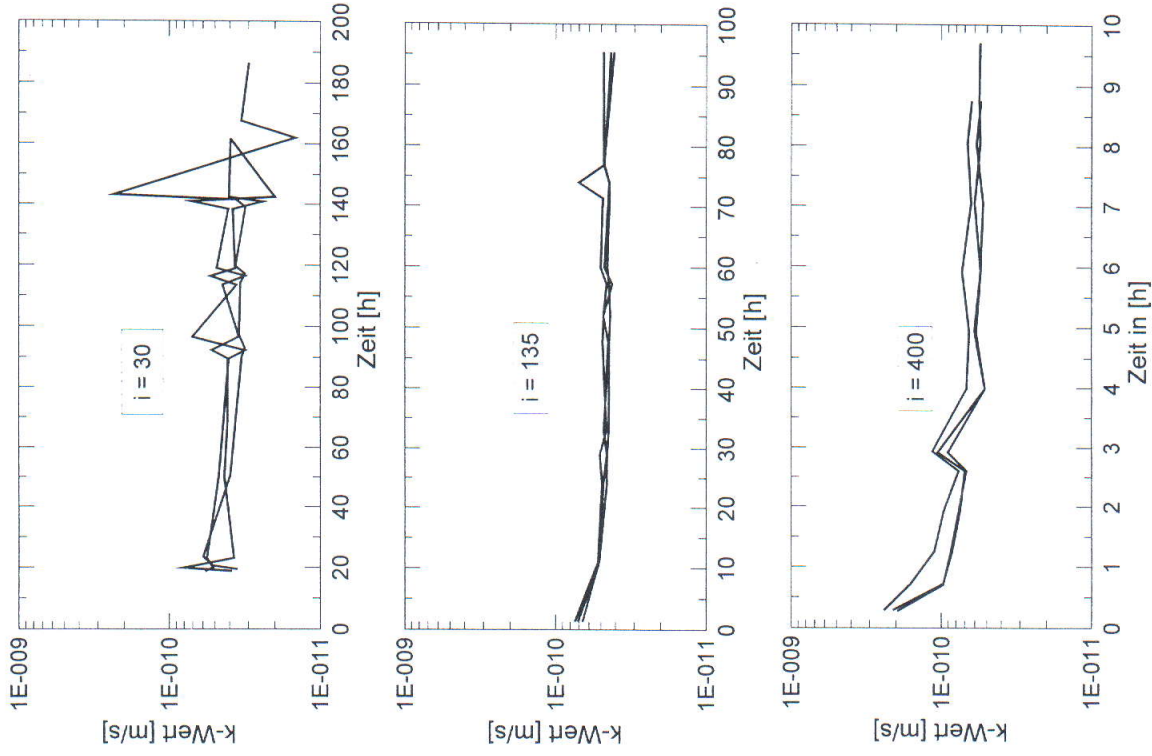


Bild 3.4: Streuung und der Meßergebnisse bei unterschiedlichen Gradienten am Beispiel s Ton k_{10} -Anlage

3.2.2 Ergebnisse der Proben auf der trockenen Seite

VR IV bis VIII, siehe Tabelle 3.1, wurden bei $D_{pr} = 0,97$ auf der trockenen Seite eingebaut und solange durchströmt, bis sich konstanter Durchfluß in den Probekörpern einstellte, d. h., es kann von vollständiger Wassersättigung bei Versuchsbeginn ausgegangen werden. Danach wurden die Gradienten schrittweise von $i = 30$ auf $i = 900$ gesteigert. Bei diesen Versuchsreihen wurde eine Verringerung des k -Wertes bei steigendem Gradienten beobachtet, was gegensätzliches Verhalten zu den Proben der VRI bis III zeigt. Diese Verringerung des k -Wertes wird auf die Strukturveränderungen im Korngerüst von einer Flockenstruktur in eine disperse Struktur bei Übertreten vom trockenen auf den nassen Ast zurückgeführt, siehe auch *Kempfert/Stadel (1994)*.

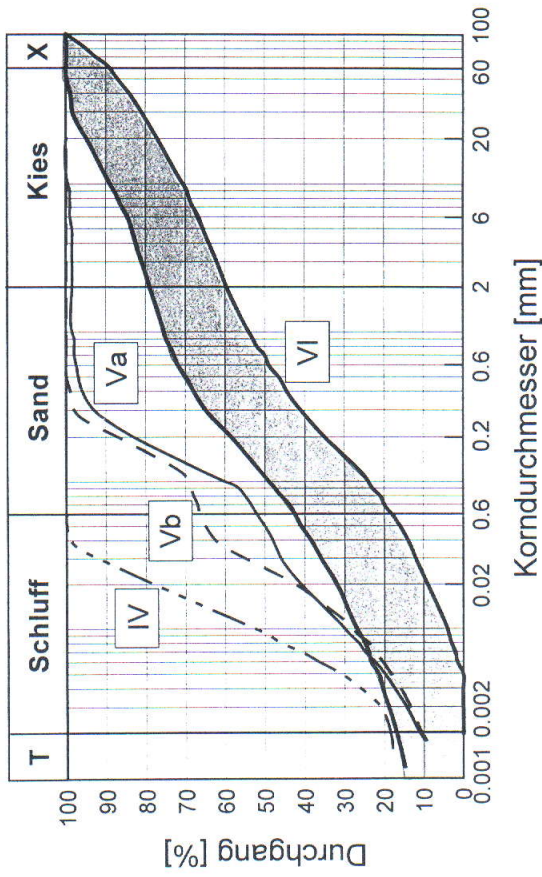


Bild 3.5: Körnungslinien von tonigem Schluff (VR IV), Sand-Schluffgemisch (VR V) und von Geschiebelehm (VR VI)

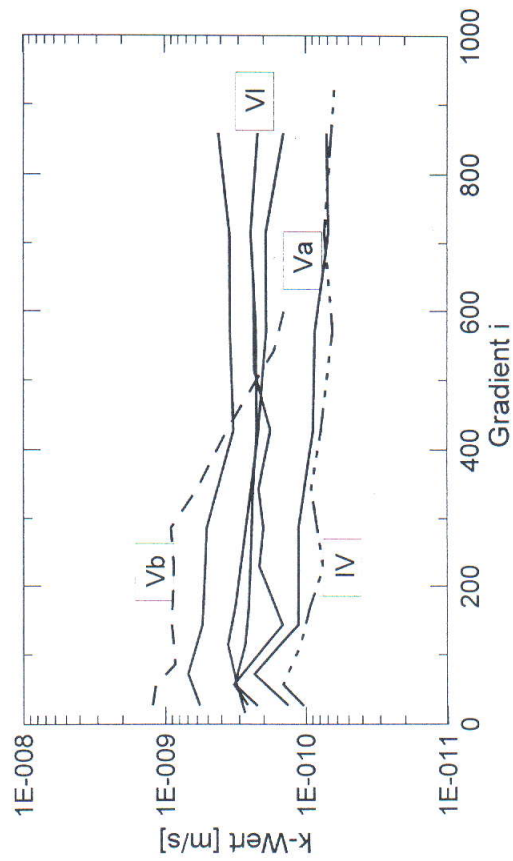


Bild 3.6: k -Werte von tonigem Schluff (VR IV), Sand-Schluffgemisch (VR V) und von Geschiebelehm (VR VI) in Abhängigkeit vom Gradienten i

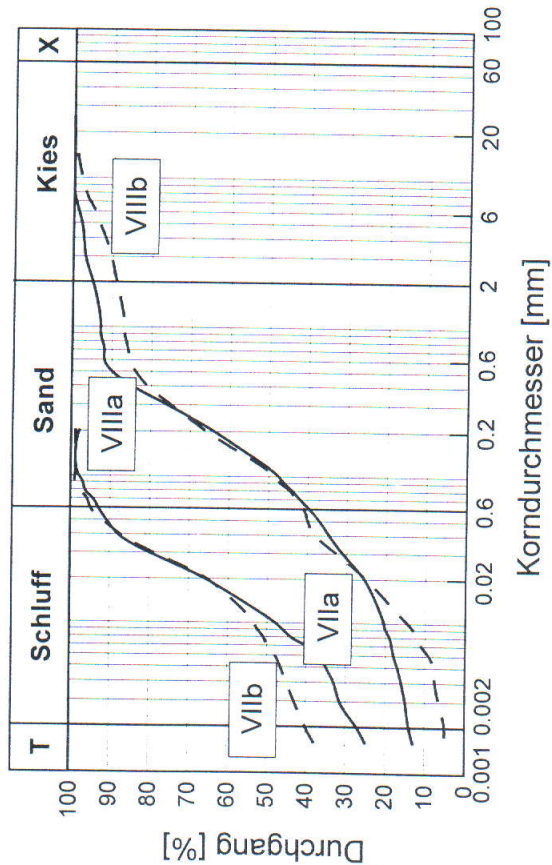


Bild 3.7: Kornungslinien von tonigem Schluff (VR VII) und von stark schluffigem Sand, schwach kiesig (VR VIII)

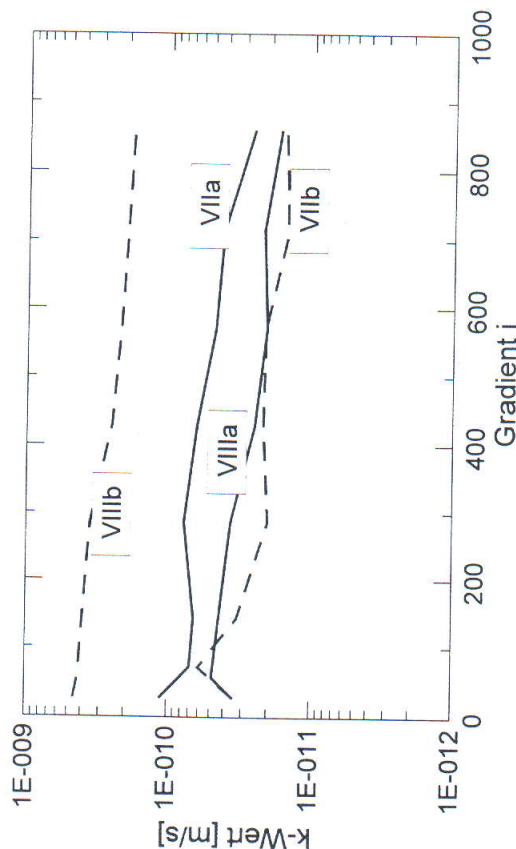


Bild 3.8: k-Werte von tonigem Schluff (VR VII) und von stark schluffigem Sand, schwach tonig (VR VIII) in Abhängigkeit vom Gradienten i

Weiterhin erfolgte die Gegenüberstellung der k - Werte in Abhängigkeit von der Neigung der Kornverteilungskurve, ausgedrückt durch den Ungleichförmigkeitsgrad U. VR VI weist bei U = 100 relativ konstante Durchlässigkeitsbeiwerte auf, siehe Bild 3.6, wohingegen die VR Va mit U = 50 und VR Vb mit U = 17 deutliche Veränderungen der k - Werte bei steigenden Gradienten aufweisen. Daraus wird abgeleitet, daß bei sinkendem U zunehmender Einfluß des Gradienten auf den Durchlässigkeitsbeiwert besteht.

4 Zusammenfassung

Bei den gesamten Untersuchungen wurde festgestellt, daß bei feinkörnigen Böden der Einfluß des Gradienten auf den Durchlässigkeitsbeiwert bis zu einem von der Bodenart abhängigen Grenzwert gering ist, siehe Bild 3.2. Eine allgemein gültige Aussage hinsichtlich des maximal möglichen Gradienten, beispielsweise bezogen auf den wirksamen Korndurchmesser, kann jedoch mit den vorliegenden Untersuchungen nicht getroffen werden. Die Beziehung zwischen dem wirksamen Korndurchmesser und dem Gradienten nach *Ohde (1956)* wurde in der dort genannten Form nicht bestätigt. Weiterhin geht aus den Untersuchungen hervor, daß bei gemischtkörnigen Böden, die einen großen Ungleichförmigkeitsgrad aufweisen, der Gradient die Durchlässigkeit weniger beeinflusst als bei Böden mit kleinem Ungleichförmigkeitsgrad.

Ein wesentlicher Einfluß auf eine schnelle und zuverlässige Bestimmung des k - Wertes stellt die Art der Probensättigung dar. Bei Bodenproben, die durch Aufbringen eines Sättigungsdruckes nach *DIN 18 130* gesättigt wurden, konnten die Durchlässigkeitsprüfungen schon nach ein bis zwei Tagen durchgeführt werden. Im Vergleich dazu wurden bei Probensättigung mittels Durchströmung mit kleinen Gradienten 10 bis 12 Tage bis zu den ersten Messungen benötigt. Ein Vergleich der Ergebnisse unter beiden Versuchsrandbedingungen zeigte geringen Einfluß auf den k - Wert, siehe Bild 3.3.

In Bild 4.1 sind die Auslaufmengen in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeigt, woran zu erkennen ist, daß gleicher Durchfluß bei hohen Gradienten wesentlich schneller erreicht werden kann als bei kleineren Gradienten. Weiterhin sind die Meßergebnisse mit einem höheren Gradienten als i = 30 gleichmäßiger, siehe Bild 3.4. und Meßergebnisse können schneller erzielt werden, Bild 4.1.

Die Untersuchungen in den Versuchsreihen VR I bis VIII haben ergeben, daß Durchlässigkeitsprüfungen bis zu einem Gradienten von i = 150 unbedenklich sind.

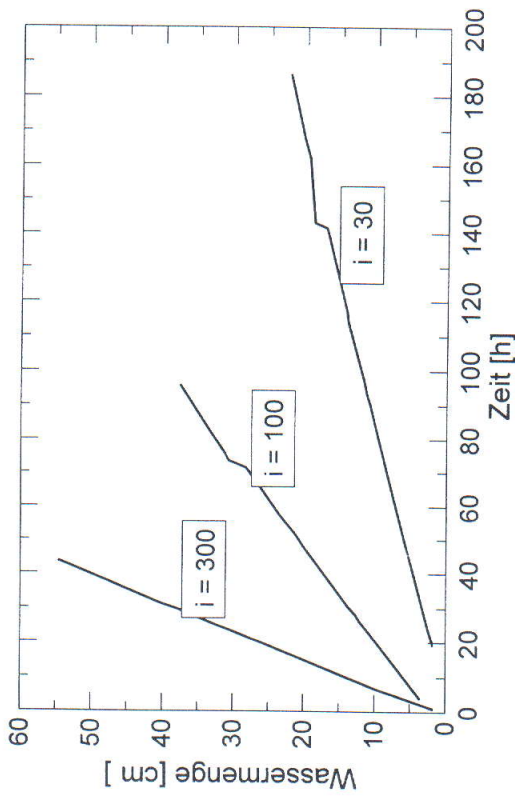


Bild 4.1: Darstellung der Auslaufwassermengen in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Gradienten am Beispiel des Toncs, VR I

Folgende Empfehlungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen für die im Deponiebau notwendigen Durchlässigkeitsuntersuchungen:

- Die Bodenproben sind bei $D_{Pr} = 0,97$ auf der nassen Seite einzubauen.
- Die Proben sättigung soll durch das Aufbringen eines Sättigungsdruckes nach *DIN 18 130* gewährleistet werden.
- Die Prüfung der Durchlässigkeit kann bei Gradienten bis $i = 150$ erfolgen.

Mit diesen Randbedingungen liegen Ergebnisse von Durchlässigkeitsprüfungen bereits nach 3 bis 4 Tagen vor, ohne dabei eine Strukturzerstörung hervorzurufen, was einen Beitrag zur Qualitätssicherung im Deponiebau darstellt.

5 Literatur

- DIN 18 130 – I (1998):* Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes
- Dunn, R. J. / Mitchell J. K. (1984):* Fluid Conductivity Testing of Fine-Grained Soils; Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, P. 1648-1665
- Gabener H.G. (1983):* Untersuchungen über die Anfangsgradienten und Filtergesetze bei bindigen Böden; Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik Universität Gesamthochschule Essen, Heft Nr. 6
- Gabener H.G. (1986):* Filtergesetze zur Bestimmung der Durchlässigkeit mineralischer Abdichtungen; Beiheft zu Müll und Abfall Nr. 24, S.43-54
- Hardt, G. (1985):* Basisabdichtungen aus Ton; Bodenmechanische und hydrologische Probleme bei Abfalldeponien des Grundbauinstitutes der LGA Bayern, H. 44
- Horst M. (1997):* Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen zur Qualitätssicherung mineralischer Abdichtungen; Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, Heft 54
- Kempfert, H.G. / Stadel, M. (1994):* Die Qualität verdichteter mineralischer Erdstoffe im Deponiebau. Müll und Abfall 1994, S. 489-501
- Kézdi, A. (1970):* Handbuch der Bodenmechanik, Band I: Bodenphysik, VEB Berlin und Akadémia Kiadó, Budapest
- Ohde, J. (1956):* Eigenschaften der Böden; Grundbaumechanik II, HÜTTE-Des Ingenieurs Taschenbuch, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- Reuter, E. (1988):* Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 26
- Ruppert, F.R. / Stiriz, K.H. (1989):* Ein neues Gerät zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Böden; Geotechnik, Heft 1, S. 14-16
- Simons H. / Reuter E. (1985):* Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers; Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, Heft 18