

H. Löffler

Übersetzung

VLAHOVIC, M.: "Korrelation des Filtrationskoeffizienten und der Porosität von Tonen"  
(Proceedings IV Congress International ASSOCIATION of ENGINEERING Geology, Vol. VI, Thema 3  
New Delhi, 1962)

Zusammenfassung

In der ingenieurgeologischen Praxis besteht des öfteren die Notwendigkeit der vorläufigen Bestimmung des Filtrationskoeffizienten in Tonen (k) auf der Basis anderer physikalischer und mechanischer Charakteristiken der Tone. Eine Korrelation mit der Siebanalyse wird häufig angewendet. Wenn der Ton unterschiedlich verdichtet ist, wechselt der Filtrationskoeffizient, und deshalb wird dieser Koeffizient präzise auf der Basis der Korrelation mit der Porosität (n) bestimmt.

Um die Porosität von Tonen im Labor zu bestimmen, werden die Proben bei einer Temperatur von 105° C getrocknet. Den Proben wird so das freie und locker gebundene Wasser entzogen. Die so bestimmten Werte der Porosität sind größer als die Porosität, die eine Strömung von freiem Wasser unter natürlichen Verhältnissen und unter Aktivität der Gravitationskraft ermöglicht. Um die exakte Situation darstellen zu können, ist es notwendig, die Porosität aufzulösen, die mit freiem Wasser aufgefüllt werden kann (n<sub>sw</sub>). Diese Porosität kann aus der Differenz zwischen der aus dem Laborprozess erzielten Porosität (n) und der Plastizitätsgrenze (n<sub>p</sub>) bestimmt werden, weil die Plastizitätsgrenze dem Betrag des locker gebundenen Wassers entspricht (n<sub>sw</sub> = n - n<sub>p</sub>).

In seinen weitreichenden Untersuchungen hat M. VLAHOVIC die Beziehungen zwischen den Filtrationskoeffizienten in Tonen (k) und dem Koeffizienten der Porosität, der mit dem freien Wasser korrespondiert (e<sub>fw</sub>), bestimmt.

Einführung

In der ingenieurgeologischen Praxis besteht des öfteren die Notwendigkeit der vorläufigen Bestimmung des Filtrationskoeffizienten in Tonen auf der Grundlage anderer physikalischer und mechanischer Charakteristika der Tone. In diesem Fall werden sehr häufig die Beziehungen des Filtrationskoeffizienten (k) zu den Siebanalysen oder zu dem relativen Porenraum (Porenziffer e) genutzt. Der Filtrationskoeffizient (k) ist auch unterschiedlich, wenn der Verdichtungsgrad in einigen Tonen variiert. Deshalb bieten die Beziehungen dieses Indikators und des Filtrationskoeffizienten (k) präzisere Ergebnisse. Aus der Kenntnis dessen hat K. TERZAGHI (2) die empirische Beziehung mit der definierten Gleichung

$$k = f (e - 0,15)^3 (1 + e) \quad (1)$$

ersetzt.

$$f = 10^{-6} = \text{const.}$$

e = Porenziffer, relativer Porenraum.

ROZENVY (1927) hat theoretisch die Gleichung der Beziehung zwischen dem Filtrationskoeffizienten ( $k$ ) und der Porosität ( $n$ ) entwickelt:

$$k = F \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{S_a^2} \quad (2)$$

Hierin sind:

$F = 0,5 = \text{const.}$   
 $n = \text{Porosität und}$   
 $S_a = \text{spezifischer Bereich der Porosität}$

GARMEN (1938) hat mitgeteilt, daß die Gleichung (2) am besten mit den Ergebnissen von Untersuchungen eingesetzt werden kann, die er an Tonproben vorgenommen hat, wenn  $F = 0,2$  verwendet wird. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Untersuchungen an Tonproben haben NISHIDA und NAKAYAMA (5) eine Gleichung bestimmt, durch die der Filtrationskoeffizient ( $k$ ) mit dem Wert der Porenziffer ( $e$ ) und der Plastizitätszahl ( $I_p$ ) festgelegt wird:

$$\log k_{10} = \left[ \frac{e}{0,01 I_p + 0,05} \right] - 10 \quad \text{I}_p \text{ in } \% \quad (3)$$

Die Gleichung der Beziehung des Filtrationskoeffizienten ( $k$ ) und der Porenziffer ( $e$ ) lautet nach SUKLE (7):

$$k = \text{Exp} (0,60206 \sqrt{e} - 7,9633) \quad (4)$$

Die Gleichungen (1), (3) und (4) sind sehr einfach und bequem in der Anwendung.

#### Mit freiem Wasser auffüllbare Porosität ( $n_{fz}$ )

Die Genauigkeit der durch die Gleichungen (1), (3) und (4) definierten Beziehungen wurden an dem Wert des Filtrationskoeffizienten ( $k$ ) und der Porenziffer ( $e$ ) getestet, die für die Untersuchung verwendet wurden. Zu diesem Zweck hat M. VLAHOVIC in der Grafik die Gleichungen (1), (3) und (4) neben den Ergebnissen von 120 Untersuchungen dargestellt (Abb. 1). Tone und Schluffe unterschiedlicher Plastizitätsmerkmale werden durch Vergleich betrachtet (OI, GI, LI, MI und III).

Es kann auf dem Diagramm (Abb. 1) festgestellt werden, daß ein Teil der Ergebnisse beträchtlich von der Fläche abweicht, in der die Mehrheit der Daten liegt. Diese Ergebnisse sind zur besseren Kenntlichmachung eingekreist.

Die festgestellten Abweichungen können als mögliche Fehler der Geräte oder des Ausführenden während der Untersuchungen erklärt werden. Nichtsdestoweniger folgen jedoch genauere Betrachtungen, daß die Abweichungen gesetzmäßig aus den Proben resultieren, deren obere Plastizitätsgrenze ( $U_p$ ) beträchtlich größer als die der anderen Proben ist. Das bedeutet, daß diese Abweichungen durch die obere Plastizitätsgrenze ( $U_p$ ) oder die Eigenschaften, die die obere Plastizitätsgrenze beeinflussen, bedingt sein können. Es wurde außerdem beobachtet, daß die Porenziffer dieser Proben bei  $e = 2 \dots 3,9$  liegt. Die Werte der Porenziffer wurden durch die Untersuchungen in Labor bestimmt, wobei die Proben bei einer

Temperatur von  $105^{\circ}\text{C}$  getrocknet worden sind. Dabei verdunsten das freie und das locker gebundene Wasser aus den Proben. Tatsächlich wurden die Werte des Filtrationskoeffizienten an wassergesättigten Proben mit Temperaturen um  $20^{\circ}\text{C}$  bestimmt. Bei dieser Temperatur sind locker gebundenes Wasser und Mineralpartikel Teile eines Ganzen. In diesem Fall ist die mit freiem Wasser auffüllbare Porosität kleiner als die durch Trocknen der Proben bei  $105^{\circ}\text{C}$  ermittelte. Fehler scheinen dabei unvermeidlich, wenn die nach dem Standardverfahren im Labor bestimmte Porosität verwendet wird. Diese Fehler werden in theoretischen Untersuchungen und in der Lösung praktischer Filtrationsprobleme sowie in der Verfestigung gesehen. Um dies zu vermeiden, ist es notwendig, einen Ausdruck "Mit freiem Wasser auffüllbare Porosität" ( $n_f$ ) einzuführen.

Unter Annahme der Tatsache, daß die Werte der oberen Plastizitätsgrenze ( $w_p$ ) annähernd auf die Werte des locker gebundenen Wassers (4) und (8) reagieren, kann die Gleichung wie folgt geschrieben werden:

$$n_f = n - w_p \quad (5)$$

In Gleichung (5) bedeuten die Symbole:

- $n_f$  = mit freiem Wasser auffüllbare Porosität
- $n$  = Durch Trocknen der Proben bei  $105^{\circ}\text{C}$  bestimmte Porosität
- $w_p$  = obere Plastizitätsgrenze

Entsprechend Gleichung (5) kann der Koeffizient der Porosität freien Wassers ( $e_{f_w}$ ) durch die Gleichung

$$e_{f_w} = \frac{n - w_p}{1 - (n - w_p)} \quad (6)$$

definiert werden.

Durch Einführung des Ausdruckes "Mit freiem Wasser auffüllbare Porosität" ist es möglich, das Wesen des Prozesses der Filtration und Verfestigung in Wasser gesättigten Tonen besser zu verstehen. Wenn  $n_f > w_p$  bzw.  $n_f > 0$  und  $e_{f_w} > 0$ , dann gibt es in den Tonen eine mit freiem Wasser auffüllbare Porosität (Abb. 2A). Freies Wasser ist dann in den Filtrationsprozeß eingeschlossen, und die Filtration vollzieht sich nach dem DARCY'schen Gesetz.

Wenn  $n_f$  gleich ist  $w_p$  oder  $n_f = 0$  bzw.  $e_{f_w} = 0$ , kommen die Schichten locker gebundenen Wassers um die Mineralpartikel durch ihre äußeren Teile in Kontakt miteinander (Abb. 2B).

Wenn  $n_f < w_p$  bzw.  $n_f < 0$  und  $e_{f_w} < 0$ , ist aus den Poren des Tonen sowohl alles Grundwasser als auch ein Teil des locker gebundenen Wassers verdrängt (Abb. 2C).

In den letzten beiden Fällen (Abb. 2B und 2C) kann am Filtrationsprozeß nur locker gebundenes Wasser teilnehmen, Filtration und

Verfestigung in Tonen verlaufen sicherlich nicht in Übereinstimmung mit dem Gesetz von DARCY.

#### *Zur Aufstellung der*

Beziehungen zwischen dem Filtrationskoeffizienten  $k$  und der mit freiem Wasser aufspülbaren Porenzahl ( $ef_v$ ) werden die Daten der Untersuchungen verwendet, die in Diagramm der Abb. 1 dargestellt sind. Die Werte der mit freiem Wasser auffüllbaren Porenzahl ( $ef_v$ ) werden entsprechend der Porosität ( $n$ ) und der oberen Plastizitätsgrenze ( $U_0$ ) unter Anwendung der Gleichung (6) bestimmt.

Die Werte des Filtrationskoeffizienten ( $k$ ) werden sofort durch Untersuchung an den in die Instrumente mit korrespondierendem Wasserspiegel eingebrachten Proben bestimmt.

Die Werte dieser beiden Indikatoren häufen sich auf dem Diagramm der Beziehung  $ef_v - k$  in Abb. 3. Die von der Beziehung  $e - k$  nach Abb. 1 abweichenden Werte sind in diesem Diagramm ebenfalls umrandet. Auf diesem Diagramm (Abb. 3) ist deutlich zu sehen, daß die Daten jetzt in die Beziehung  $ef_v - k$  eingefügt sind. Sie liegen entweder in dem Bereich mit anderen Daten zusammen oder in dem Teil des Diagramms mit negativen Werten ( $ef_v < 0$ ).

Nach den Methoden der mathematischen Statistik wurde eine Gleichung entwickelt, die annähernd die Daten in Diagramm der Abb. 3 zeigt. Sie lautet:

$$k = 10 (1,6 ef_v + 2,1) - 10 \quad (7)$$

Die durch die Gleichung (7) definierte Beziehung  $ef_v - k$  ist grafisch in Diagramm der Abb. (3) genauso dargestellt wie die anderen Daten. Die Beziehungen der definierten Gleichungen (1), (3) und (4) sind nicht auf der mit freiem Wasser auffüllbaren Porenzahl begründet. Deshalb können sie nicht direkt mit den im Diagramm der Abb. (3) gezeigten Daten verglichen werden.

Entsprechend den nach statistisch-mathematischen Prinzipien begründeten Analysen wurde festgestellt, daß die Abweichungen der Gleichungsgrafik (7) von den in Abb. (3) gezeigten experimentellen Daten kleiner sind als die Abweichungen nach den Gleichungsgrafiken (1), (3) und (4) und natürlich unter Berücksichtigung der Daten aus Abb. (1). Außerdem nähert sich die Verlängerung der mit unterbrochenen Strichen in Abb. (3) dargestellten Gleichungsgrafik (7) sehr gut den Daten mit den negativen Werten  $ef_v$ .

#### Abschließende Bemerkungen:

In der Ingenieurgeologischen Praxis wird die vorläufige Bestimmung des Filtrationskoeffizienten ( $k$ ) häufig aus der Beziehung mit Siebanalysen oder mit der Porenziffer ( $e$ ) verwendet. Wenn der Grad der Lagerungsdichte im selben Ton unterschiedlich ist, so ist es auch der Filtrationskoeffizient ( $k$ ). Folglich kann der Filtrationskoeffizient präzise auf der Grundlage der Porenzahl bestimmt werden. Die Beziehung  $e - k$  kann einfach durch die Anwendung der Gleichungen (1), (3) und (4) definiert werden.

Beim Vergleich der durch die Gleichungen (1), (3) und (4) definierten Beziehung  $e - k$  mit den experimentellen Ergebnissen anhand von 120 Ton- und Schluffproben verschiedener Plastizitätsmerkmale (Cl, Ch, ML, MI und MH) werden beträchtliche Abweichungen festgestellt.

Die Ursache dieser Abweichungen liegt in der Vernachlässigung des vorhandenen locker gebundenen Wassers in Tonen und Schluffen unter natürlichen Bedingungen während der Experimente (locker gebundenes Wasser entweicht aus den Poren).

Die Vernachlässigung des locker gebundenen Wassers wird durch die Einführung des Ausdruckes "Porosität" ( $nf_v$ ) oder "Porenzahl, die durch freies Wasser aufgefüllt werden kann ( $ef_v$ )" eliminiert. Beide Indikatoren tragen zum besseren Verständnis des Charakters des Filtrationsprozesses und der Konsolidation in Wasser gesättigten Tonen und Schluffen bei.

Wenn  $nf_v \leq 0$ , bzw.  $ef_v \leq 0$ , so vollziehen sich die Prozesse der Filtration und Konsolidierung nicht entsprechend Gesetz von DARCY. Bei Anwendung der Beziehungen zwischen dem Filtrationskoeffizienten ( $k$ ) und der durch freies Wasser auffüllbaren Porenzahl ( $ef_v$ ), die durch Gleichung (7) repräsentiert wird, sind die Werte des Filtrationskoeffizienten präziser determiniert als durch die Gleichungen (1), (3) und (4).

#### Literaturangaben:

1. BOHMERLJENKO, N.-F.: Fizika Dvizenija podzemnih vod. Gidrometeoizdat, Leningrad, 1973
2. BORELLI, M.: Hidraulika. Građevinski Fakultet Univerziteta u Beogradu, 1976 Beograd
3. KISELJEL, I.: The properties of the oriented clay Saopćenja 4. Podunavske-evropskog savetovanja za mehaniku tla i fundiranje. Bled, 1974
4. LONTADZE, V.-D.: Formirovanie fiziko mehanicavskih svojstvu glinistih porod pri litifikacij. Autorreferat Disertaciji. Geologičeski fakultet, Moskva, 1958
5. NISHIDA, Y., HAKAGATAS. Water permeability and plastic index of soils Land subsidence IACH-UNESCO
6. PANJUKOV, P.-N.: Inženjerska geologija. Građevinska knjiga, Beograd, 1965
7. SUKIJE, L.: Consolidation of viscoas soils subjected to continuousy increasing uniform load. Praha, 1969
8. TERZAGHI, K.: Principles in soil mechanics. Determination of the permeability of clay Ing. News. Rec. 95, 1925
9. VLAHOVIC, M.: Prilog proučavanju procesa filtracije i konsolidacije normalno konsolidovanih tla. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1977

**Anmerkung des Übersetzers:**

Die Gleichungen (2) und (4) sind im Originaltext offensichtlich fehlerhaft abgedruckt. Eine Korrektur konnte nicht vorgenommen werden.

Für die Richtigkeit der Übersetzung. Dipl.-Geol. Busse, V.

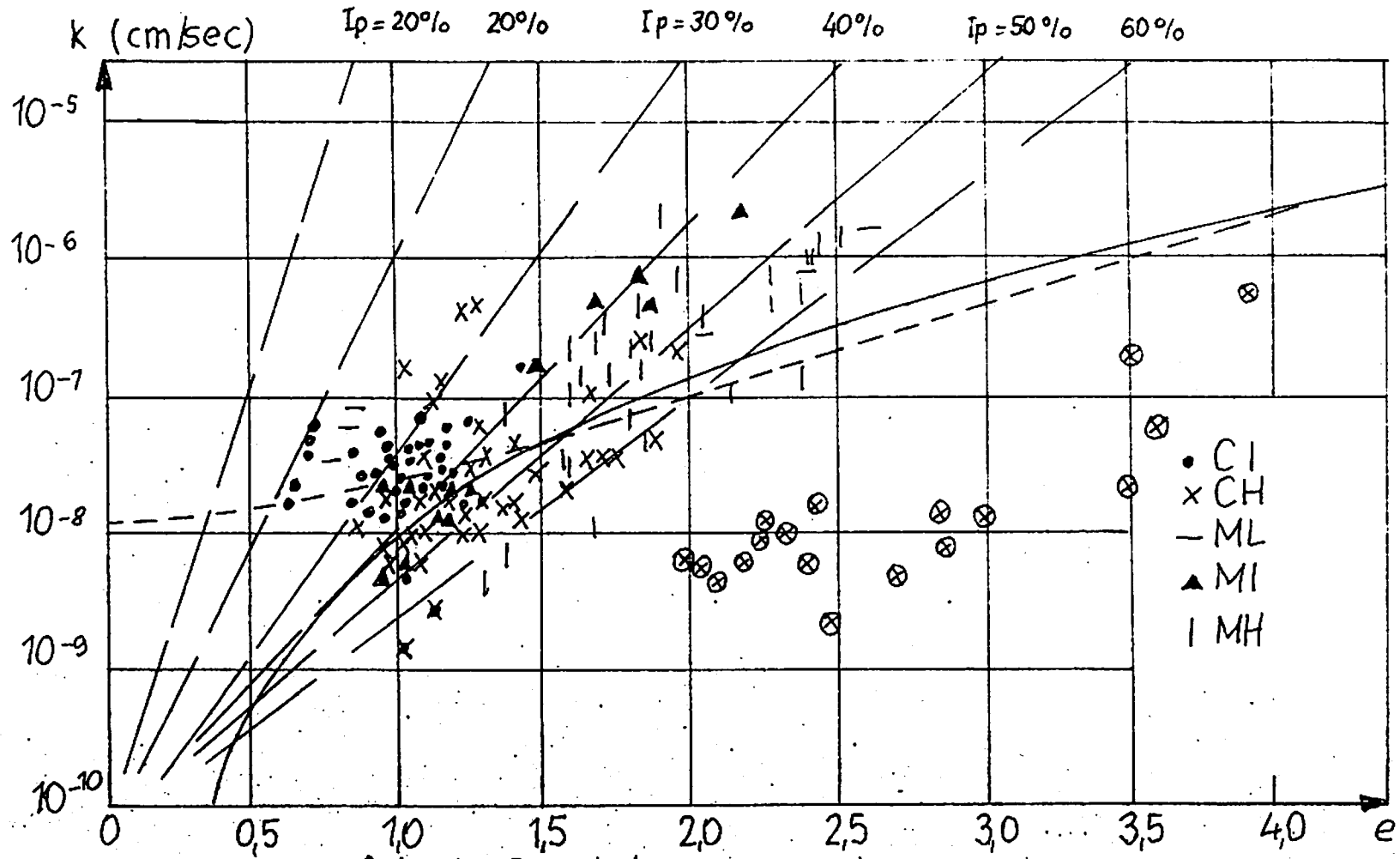


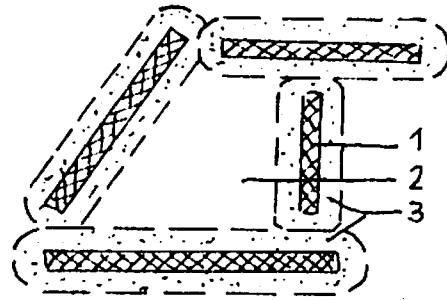
Abb. 1. Beziehung e-k

———— Terzaghi; ——— Nishida und Nakagava; - - - - Šuklje

a)

$$n_{fw} > 0$$

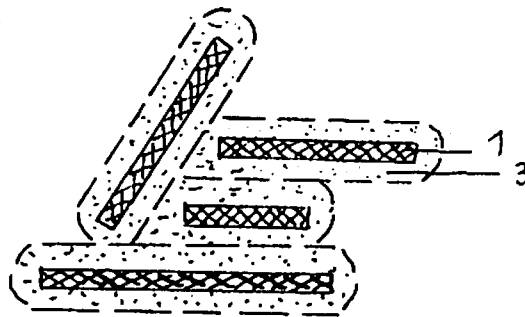
$$e_{fw} > 0$$



b)

$$n_{fw} \approx 0$$

$$e_{fw} \approx 0$$



c)

$$n_{fw} < 0$$

$$e_{fw} < 0$$

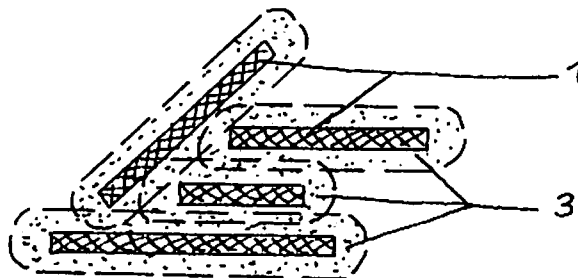


Abb. 2. Anordnung des freien und des locker gebundenen (osmotischen) Wassers  
1 - Ton ; 2 - freies Wasser ; 3 - osmotisch gebundenes Wasser



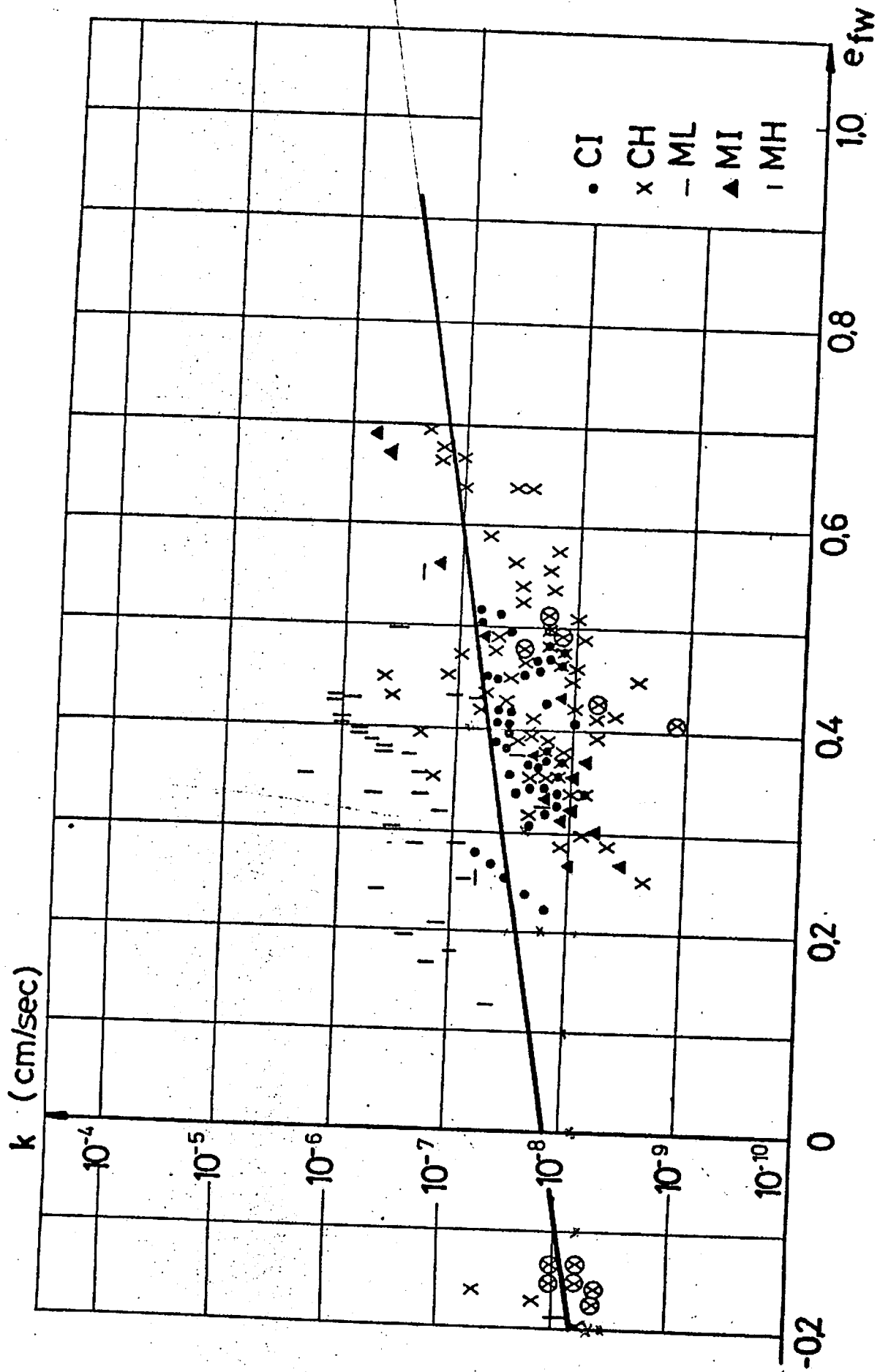


Fig. 3. Correlation  $efw - k$