

VEB Hydrogeologie, Nordhausen
Betrieb des VEE Kombinat
Geologische Forschung und Erkundung
Arbeitsstelle Dresden
Gruppe Methodische Forschung

Dresden, den 31. 10. 1979

Geheimhaltungsgrad darf nur
mit Zustimmung des Heraus-
gebers aufgehoben werden

Nur für den Dienstgebrauch

S t u d i e

zum F/E-Thema

Erforderliche Genauigkeiten hydro-
geologischer Untersuchungen für den
Grundwasservorratsnachweis

Teilthema

Genauigkeit der Verfahren
der k-Wert-Ermittlung

Geheimhaltungsgrad: Nur für den Dienstgebrauch

Die vorliegende Studie wird hierdurch bestätigt.

Verteiler:

VEB Kombinat GFE (2 x)

VEB HGN (T, TF, TF4, G, GE, GEY, GE3, GE4, GE6, GE8)

OBD Poznan

Thema: Erforderliche Genauigkeiten hydro-
geologischer Untersuchungen für den
Grundwasservorratsnachweis

Teilthema: Genauigkeit der Verfahren der
k-Wert-Ermittlung

Plannummer: 006/1175

Komm.-Nr.: 880.04.003.0

**Name und Anschrift des
Betriebes, in dem diese
Arbeit erstellt wurde:** VEB Hydrogeologie, Nordhausen
55 Nordhausen
Rothenburgstr. 12

Bearbeiter: Dr. H.-F. Bamberg

Bearbeitungszeitraum: 7/78 - 10/79

Berichtsleistung lt. Plan: A 4 (Studie)

Geheimhaltungsgrad: NfD

**Form, in der voraus-
sichtlich die Auswertung
der Arbeit erfolgt:** Berücksichtigung für Komplexmethodik
Hydrogeologie

Dipl.-Ing. R. Grenke
 Direktor für
 Forschung u. Technik

Dipl.-Ing. L. Kurth
 HA-Leiter Forschung
 und Entwicklung

Dr. rer. nat. Bamberg
 Gruppenleiter
 Methodische Forschung
 Themenverantwortlicher

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Volkswirtschaftliche Zielstellung	V
1. Vorbemerkungen	1
2. Beschreibung der Durchlässigkeit	2
3. Eigenschaften und Abhängigkeiten des k-Wertes	7
3.1. Einfluß des Zustandes des Filtrationsmilieus	8
3.1.1. Abhängigkeit des k-Wertes von der Geometrie des Porenraumes	8
3.1.2. Einfluß der Wasserbeschaffenheit	19
3.2. Einfluß des Filtrationsprozesses resp. Wechselwirkungen zwischen Gestein und Wasser	22
3.2.1. Hydraulischer Gradient und Filtergeschwindigkeit	22
3.2.2. Mehrphasenströmung	28
3.2.3. Kluftströmung	30
3.2.4. Strömung in bindigen Gesteinen	30
3.2.5. Einfluß der Kompressibilität	32
3.2.6. Vertikal- und Horizontalströmung	32
3.3. Zusammenfassende Bewertung	35
4. Klassifikation der Durchlässigkeit	36
5. Zur Parametergenauigkeit in der Grundwasser-erkundung	42
5.1. Genauigkeit der Einzelparameter	43
5.2. Repräsentanz des Einzelwertes	45
6. Genauigkeit der k-Wert-Bestimmungsverfahren	55
6.1. Labormethoden	56
6.1.1. Permeametermessungen	56
6.1.2. Mittelbare Bestimmungsmethoden (k-Werte aus Siebanalysen)	58
6.2. Feldmethoden	60
6.2.1. Pumpversuche	60
6.2.1.1. Meßfehlereinfluß bei Pumpversuchen	62
6.2.1.2. Einfluß methodischer Fehler	65
6.2.1.3. Gesamtfehler bei Pumpversuchen	71

	Seite
6.2.2. Hydraulische Bohrlochversuche	72
6.2.3. Geophysikalische Bohrlochmessungen	73
7. Gegenüberstellung verschiedener Verfahren	74
8. Erforderliche Genauigkeiten der k-Werte	84
9. Zusammenfassung	89
Literaturverzeichnis	92

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Definitionen des Durchlässigkeitsbeiwertes	4 Blätter
Anlage 2	k-Werte (Klassifikationen und Zuordnung zu Gesteinen)	13 Blätter
Anlage 3	Verfahren zur k-Wert-Bestimmung	61 Blätter
Anlage 4	Diagnostizierung von PV-Ergebnissen	5 Blätter

Volkswirtschaftliche Zielstellung

Bezugnahme

- Pflichtenheft vom 10. 1. 1977
- Präzisierung der Teilthemenbearbeitung vom 24. 5. 1977
- Lösungsweg (A 2) für Teilthema "k-Werte" vom 30. 9. 1977
- Niederschrift zum Stand der Bearbeitung vom 13. 2. 1978
- Präzisierung des Themenablaufes vom 12. 6. 1979
- Formblätter 1515 von 1975, 1976, 1977, 1978
- Protokolle über Konsultationen mit OBD Poznan vom 5. 12. 1975, 7. 5. 1976, 19. 11. 1976, 9. 9. 1977, 24. 11. 1978

Im Pflichtenheft zum F/E-Hauptthema "Erforderliche Genauigkeiten hydrogeologischer Untersuchungen für den Grundwasservorratsnachweis" wurde u. a. eine ausführliche Problemanalyse vorgenommen, aus der sich ergeben hat, daß die Themenbearbeitung mit der Lösung von mehreren Teilthemen verbunden ist. Diese sollten z. T. gesondert und von verschiedenen Institutionen bearbeitet werden. Eine Zusammenfassung und Aufbereitung der Teilthemenresultate erfolgt erst in der letzten Bearbeitungsphase.

Wichtigster Partner des VEB Hydrogeologie für die Realisierung der Aufgaben ist OBD Poznan (VR Polen), wobei aus praktischen Erwägungen eine Unterteilung in zwei Hauptkomplexe erfolgte:

- A) Fehler bei der Informationsgewinnung und -aufbereitung
(Erkundungsmethoden, Untersuchungsverfahren, hydrogeologische Parameter usw.)
Bearbeiter: VEB Hydrogeologie
- B) Fehler bei der Informationsverarbeitung und Vorratsberechnung
(Berechnungsverfahren, Schematisierungen, Vorräte usw.)
Bearbeiter: OBD Poznan

Gewisse Überschneidungen sind natürlich bei der Bearbeitung nicht auszuschließen.

Als vorrangiges Teilthema des Komplexes A) wurde das Thema 2 "Bedeutung und Gültigkeit verschiedener Verfahren der k-Wert-Ermittlung" ausgewiesen. Diese Dringlichkeit wurde anlässlich der

Verteidigung des Pflichtenheftes insbesondere auch von den Organen der Wasserwirtschaft (vgl. auch Schreiben IfW vom 23. 3. 1977) nachdrücklich bestätigt.

Die generelle Notwendigkeit des Teilthemas resultiert aus dem zugehörigen Hauptthema zu Genauigkeit und wurde im Pflichtenheft vom 10. 1. 1977 ausführlich beschrieben:

- Verminderung des Erkundungsrisikos
- Qualitätsverbesserung
- Optimierung des Erkundungsaufwandes

Darüber hinaus besitzt das Teilthema für die Erkundungsarbeit ganz besondere Bedeutung, da die Parameterbestimmung eines der wesentlichsten Ziele der Erkundung und die Genauigkeit der einzelnen Verfahren nach wie vor umstritten ist. In diesem Zusammenhang geht es nicht nur darum festzustellen, inwieweit diese Verfahren die Wirklichkeit widerspiegeln, sondern letztlich beispielsweise auch um die Frage, welche Verfahren künftig bevorzugt einzusetzen sind bzw. auf welche generell verzichtet werden kann. Daraus wurde folgende Zielstellung abgeleitet:

"Es ist eine Studie zu erarbeiten, die neben einem zusammenfassenden Überblick über derzeit übliche Verfahren der k-Wert-Bestimmung folgende Aussagen enthält:

- Bedeutung, Gültigkeit und Grenzen der Verfahren;
- Einsatzmöglichkeiten und Fehlerquellen;
- Vergleichbarkeit der Verfahren untereinander;
- Empfehlungen und Schlußfolgerungen für eine Anwendung im Routinebetrieb der hydrogeologischen Erkundung unter Beachtung fachlicher und ökonomischer Aspekte sowie einer technischen Realisierbarkeit."

1. Vorbemerkungen

Die gegenwärtige Situation in der Grundwassererkundung wird durch den hohen Entwicklungsstand der geohydraulischen Berechnungs- und Modellierungsverfahren, also der Informationsverarbeitung, charakterisiert, dem nach wie vor erhebliche organisatorische, methodische und theoretische Mängel bzw. Unsicherheiten in der Informationsgewinnung und -aufbereitung gegenüberstehen. Dieser Widerspruch hat zur Folge, daß große, mögliche Genauigkeiten eines Grundwasservorratsnachweises letztlich nur vorgetäuscht aber nicht erreicht werden können, da bekannterweise jede Berechnung nur die Qualität aufweist, die die zugrunde gelegten Eingangsparameter haben.

Ursachen für diese auftretenden Schwierigkeiten liegen in der

- a) ungenügenden Kenntnis über auftretende Fehler bei der Datengewinnung im Feld und deren Auswirkungen (Meßfehler);
- b) Verwendung unterschiedlicher Verfahren zur Bestimmung der hydrogeologischen Parameter ohne genügende Kenntnis bzw. Berücksichtigung deren Gültigkeitsbereiche und Genauigkeitsgrenzen (methodische Fehler);
- c) großen Unsicherheit bei der Bestimmung und Zuordnung repräsentativer Berechnungsparameter in Abhängigkeit von der Veränderlichkeit der natürlichen hydrogeologischen Verhältnisse und der mit der Verwendung eines vorgesehenen Berechnungsverfahrens verbundenen Schematisierung.

Besonderes Interesse verdient nach den Untersuchungen von BEIMS (1974), BAMBERG/GARLING (1977) und REICHEL (1979) die letztgenannte Problematik, wobei nachdrücklich auf die Diskrepanz zwischen dem deterministischen Charakter der zur Verfügung stehenden Berechnungsverfahren und den stochastischen (zufälligen) Eigenschaften aller erkundeten hydrogeologischen Größen hinzuweisen ist.

Infolge dieser Zufälligkeit hydrogeologischer Merkmale und der noch zu beschreibenden zahlreichen und jeweils mit unterschiedlichen Fehlern behafteten Einflußgrößen stellen die verwendeten Parameter (z. B. k-Wert) vorwiegend Näherungswerte für die natürlichen Verhältnisse dar.

2. Beschreibung der Durchlässigkeit

Die Eigenschaft poröser oder klüftiger Medien, ein Strömen von Flüssigkeiten oder Gasen zu ermöglichen (vgl. TGL 23989/03) wird allgemein als Durchlässigkeit oder Permeabilität bezeichnet. Sie ist umgekehrt proportional dem Widerstand, den ein Gestein dem Fließen seines Poreninhaltes entgegensetzt.

Zur quantitativen Beschreibung der Durchlässigkeit werden verschiedene Parameter verwendet:

- k-Wert (Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser; Filtrationskoeffizient)
- K (Permeabilitätskoeffizient)
- T (Profildurchlässigkeit; Transmissibilität)
- E (Brunneneinheitsergiebigkeit)
- ϵ (spezifischer Wasserandrang nach TRUELSEN)
- WD-Wert (Wasserdurchlässigkeitswert nach TGL 23983).

Für die geohydraulische Erfassung von Grundwasserströmungsvorgängen ist der k-Wert als grundlegend und dominierend anzusehen. Ihm gelten auch die nachfolgenden Untersuchungen. Die anderen Parameter werden hier nur erwähnt.

a) Der Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser

(in der sowjetischen Literatur "Filtrationskoeffizient", in der französischen Literatur "Durchlässigkeitskoeffizient nach DARCY")

$$k = \frac{Q}{F \cdot I} = \frac{v_f}{I} \quad (1)$$

Q - Durchfluß, Volumenstrom
in (m³/s; l/s; cm/s)

F - Querschnittsfläche in (m²; cm²)

I = $\frac{d h}{d L} = \frac{\partial (p/\gamma + z)}{\partial L}$

- Standrohrspiegelgefälle

v_f - Filtergeschwindigkeit in (m/s; cm/s)

Dieser Parameter ergibt sich direkt aus dem Filtergesetz von DARCY und hat die Dimension einer Geschwindigkeit (m/s; cm/s).

b) Permeabilitätskoeffizient

(bisher "(spezifische) Permeabilität";

in der sowjetischen Literatur "Durchlässigkeitskoeffizient",

in der französischen Literatur "innerer Durchlässigkeitskoeffizient")

$$K = \frac{Q}{F \cdot I} \cdot \frac{\mu}{\gamma} = \frac{Q}{F \cdot I} \cdot \frac{\nu}{g} = k \frac{\mu}{\gamma} = k \cdot \frac{\nu}{g} \quad (2)$$

μ (häufig auch η) -
dynamische Viskosität in Poise

$$1 \text{ P} = 0,1 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cms}} = \frac{1}{98,1} \frac{\text{kp s}}{\text{m}^2}$$

ν - kinematische Zähigkeit in Stokes

$$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\nu = \mu/g$$

γ - Wichte in (kp/m^3 ; p/cm^3)

g - Erdbeschleunigung

Die Dimension von K ergibt sich aus obengenannter Gleichung in (m^2 ; cm^2) und wird i. allg. mit (Darcy) bezeichnet.

Dieser Parameter gilt als allgemeingültige Definition der Durchlässigkeit und stellt eine Gesteinskonstante dar, die sich unabhängig vom strömenden Medium und den speziellen Versuchsbedingungen ergibt.

Für hydrogeologische Routinearbeiten ist der Wert allgemein nicht gebräuchlich.

Umrechnung der Dimensionen

$$1 \text{ Darcy} = 1 \frac{\text{cm}^3 \cdot \text{cP} \cdot \text{cm}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{atm}}$$

$$\text{mit } 1 \text{ cP} = 10^{-7} \text{ Ns}/\text{cm}^2$$

$$1 \text{ atm} = 1,033 \cdot 10^1 \text{ N}/\text{cm}^2$$

$$\underline{1 \text{ Darcy} = 0,987 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2}$$

aus (30) ergibt sich für eine Wassertemperatur von 10°C
($\rightarrow \nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$$\underline{1 \text{ Darcy} \hat{=} 0,739 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} (\hat{=} k_{10} \text{ } ^\circ\text{C})}$$

Infolge des Bezuges auf die fiktive Filtergeschwindigkeit stellen auch die Größen k bzw. K fiktive Rechenwerte dar und kennzeichnen einen statistischen Mittelwert der Durchlässigkeit der durchströmten Flächen.

c) Transmissibilität

$$\begin{aligned} T &= k \cdot m \quad (\text{gespannt}) \\ T &= k \cdot H \quad (\text{ungespannt}) \end{aligned} \quad (3)$$

Der T-Wert wird in der Geohydraulik häufig in Verbindung mit nichtstationären Strömungszuständen verwendet.

m, H - Grundwasserleitermächtigkeit

d) Brunneneinheitsergiebigkeit

$$\begin{aligned} E &= \frac{Q}{s} \quad (\text{gespannt}) \\ E &= \frac{Q}{s} \frac{(2H - 1)}{(2H - s)} \quad (\text{ungespannt}) \end{aligned} \quad (4)$$

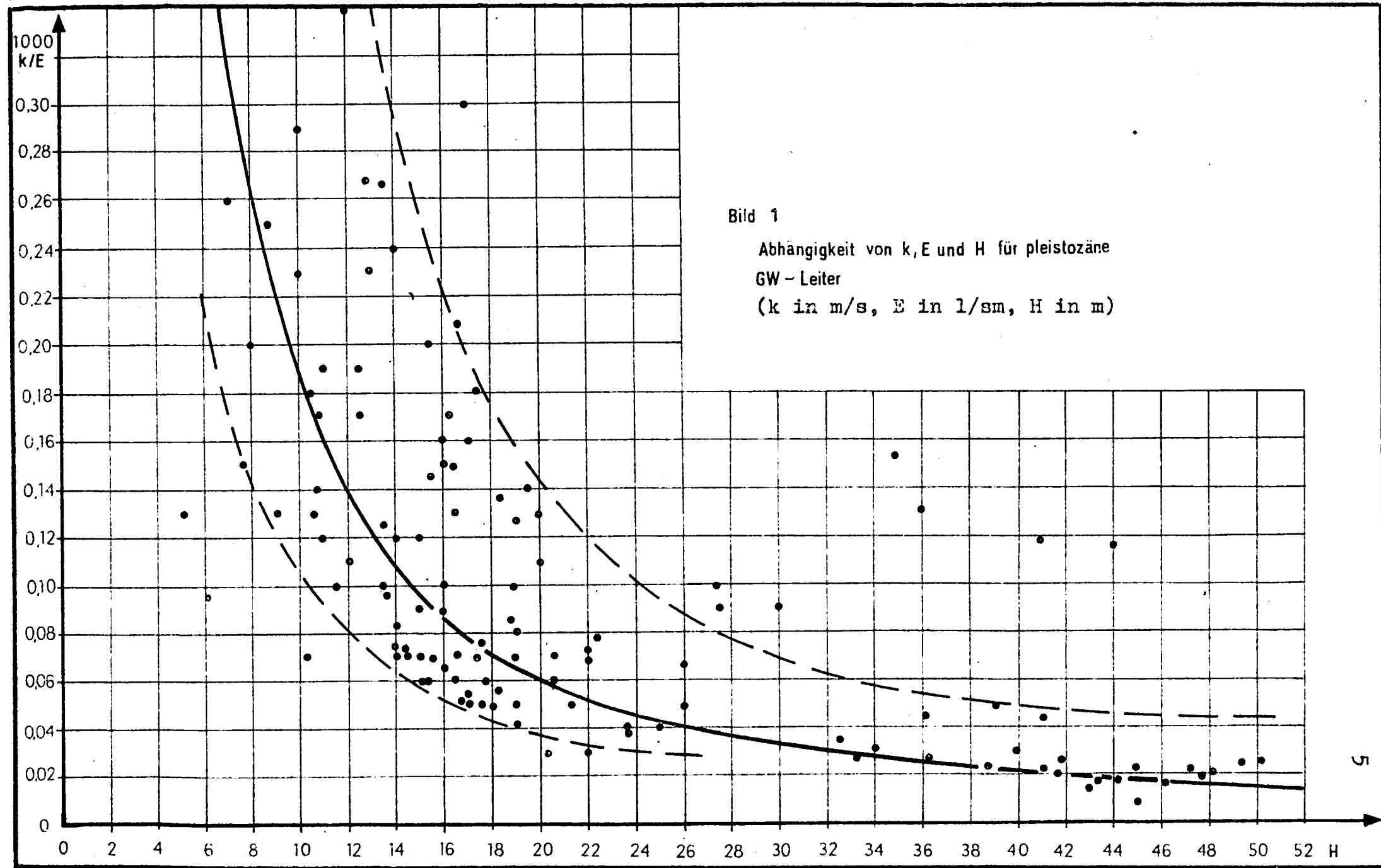
Q - Förderstrom im Brunnen

s - Absenkung

Der E-Wert gibt insbesondere für die Einschätzung der Brunnen-ergiebigkeit und daraus resultierende Brunnenbemessungen sowie zu Vergleichszwecken wichtige Hinweise. Darüber hinaus ist er ein relatives Maß der Durchlässigkeit und steht in funktionellem Zusammenhang mit dem k -Wert (vgl. TGL 23864/04):

$$T = c \cdot E \quad (5)$$

Der Faktor c kann für Überschlagsermittlungen geschätzt werden. Eine empirische Abhängigkeit wurde in Bild 1 ermittelt.



e) ϵ -Wert nach TRUNLSEN

Empirisch mittels Gruppenpumpversuch (mindestens 2 Brunnen) ermittelte "Ergiebigkeit eines Grundwasserstromes je m Breite"

$$\epsilon = \frac{Q - q}{L} \quad (6)$$

- Q - Gesamtförderstrom
 q - Förderstrom eines Einzelbrunnens
 L - Abstand der äußeren Brunnen

Das Verfahren findet kaum noch Anwendung.

f) WD-Wert (nach TGL 23983)

$$W = \frac{q}{t \cdot l} \quad \text{in (l/min m)} \quad (7a)$$

- W - gemessener WD-Wert bei Druck P
 q - eingepreßte Wassermenge in (l)
 t - Prüfdauer in (min)
 l - Länge der geprüften Bohrlochstrecke in (m)

WD-Werte werden auf einen Einheitsdruck von 3 kp/cm² bezogen:

$$W_r = \frac{W \cdot 3}{P} \quad (7b)$$

- W_r - reduzierter WD-Wert
 P - wahrer Prüfdruck in (kp/cm²)

WD-Werte werden im Rahmen ingenieurgeologischer Untersuchungen an Bohrungen im Festgestein ermittelt. Sie dienen vorwiegend der Vorbereitung von Injektionen im Speicherbau. Nach der Größe der ermittelten Werte erfolgt eine Einstufung in Kategorien nach Tabelle 1.

Tabelle 1: Kategorien für WD-Werte

Kategorie	Bezeichnung	W_r in (l/min m)
1	undurchlässig	0 ... 0,3
2	wenig durchlässig	0,3 ... 1,5
3	mäßig durchlässig	1,5 ... 5,0
4	stark durchlässig	5,0 ... 10,0
5	sehr stark durchlässig	> 10,0

3. Eigenschaften und Abhängigkeiten des k-Wertes

Bevor man sich mit der Problematik der Genauigkeit von k-Werten näher befaßt, ist es erforderlich, sich einen Überblick über die beeinflussenden Abhängigkeiten zu verschaffen.

Betrachtet man zunächst die Vielzahl der in der Fachliteratur vorhandenen Definitionen (siehe Anlage 1), so kann man insbesondere in einem Punkt unterschiedliche Meinungen erkennen:

- der k-Wert ist eine Gesteins-(Boden-)konstante;
- der k-Wert kann, infolge seiner Abhängigkeit von veränderlichen Eigenschaften des strömenden Mediums (Geschwindigkeit, Viskosität u.a.), keine Konstante sein.

Diese Auffassungen kommen auch in den unterschiedlichen Bestimmungsverfahren der k-Werte als Funktionen von Gesteinsparametern und des Grundwassergefälles zum Ausdruck, und es besitzen diesbezügliche Aussagen für die Verwendung und Bewertung von k-Werten verschiedener Herkunft wesentliche Bedeutung.

Die Durchlässigkeit eines Gesteins für Wasser ist von verschiedenen Faktoren direkt und indirekt abhängig, die man wie folgt gliedern kann:

A) Beschaffenheit von Filterkörper und Strömungsmedium, d. h. Zustand des Milieus

- Geometrie des Porenraumes (Hohlraumes)
 - . petrophysikalische Faktoren, wie Kornverteilung, Kornform, Korngröße, Porenanteil, Porenziffer, Porengröße, spezifische Oberfläche
 - . Gefüge i. w. S., wie Lagerungsdichte, Inhomogenität, Schichtung, Faziesänderung
- Wasserbeschaffenheit
 - . physikalische Faktoren, wie Viskosität, Temperatur, Dichte
 - . chemische Inhaltsstoffe

B) Wechselwirkungen Gestein/Wasser, also Strömungsprozeß
(Gültigkeitsgrenzen des DARCY-Gesetzes)

- hydraulischer Gradient, Geschwindigkeit;
- Mehrphasenströmung,
Sättigungsgrad, Benetzbarkeit,
Kapillarität;
- Poren-/Kluftströmung;
- Strömung in bindigem/nichtbindigem Material;
- Einfluß der Kompressibilität;
- Vertikal-/Horizontalströmung.

Der Zeiteinfluß auf die Durchlässigkeit, beispielsweise infolge Verwitterung, Erosion, Kolmation, biologischer Prozesse usw., wird hier nicht weiter untersucht. Es sei nur darauf hingewiesen, daß z. B. in der Bodenkunde sogar jahreszeitlich bedingte k -Wert-Schwankungen entsprechend einem Jahresrhythmus des Gefüges möglich sind (vgl. KOPP (1965)).

Infolge der beschränkten Aussagekraft von k -Werten für den Festgesteinsbereich beziehen sich die folgenden Aussagen in erster Linie auf poröse Lockergesteinsgrundwasserleiter.

3.1. Einfluß des Zustandes des Filtrationsmilieus

3.1.1. Abhängigkeit des k -Wertes von der Geometrie des Porenraumes

Um das natürliche Grundwasserregime überhaupt einer mathematischen Beschreibung zugänglich zu machen, sind einige grundlegende Annahmen und Voraussetzungen erforderlich:

- Das fließende Medium (Wasser) stellt eine reale, zähe also mit Reibung behaftete, homogene Flüssigkeit dar.
- Die Bewegung in den Poren des Grundwasserleiters (Filterströmung) wird als laminar und linear angesehen.
- Die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen erfolgt in Strömungsrichtung im Filter quasi in feinen Stromröhren (Porenkanälen).

Man kann nun zur Darstellung der Filterströmung im Porenkanal vom HAGEN-POISEUILLESchen Gesetz der laminaren Rohrströmung ausgehen (siehe Bild 2).

p_1 } Drücke auf obere und untere
 p_2 } Stirnfläche des Zylinders

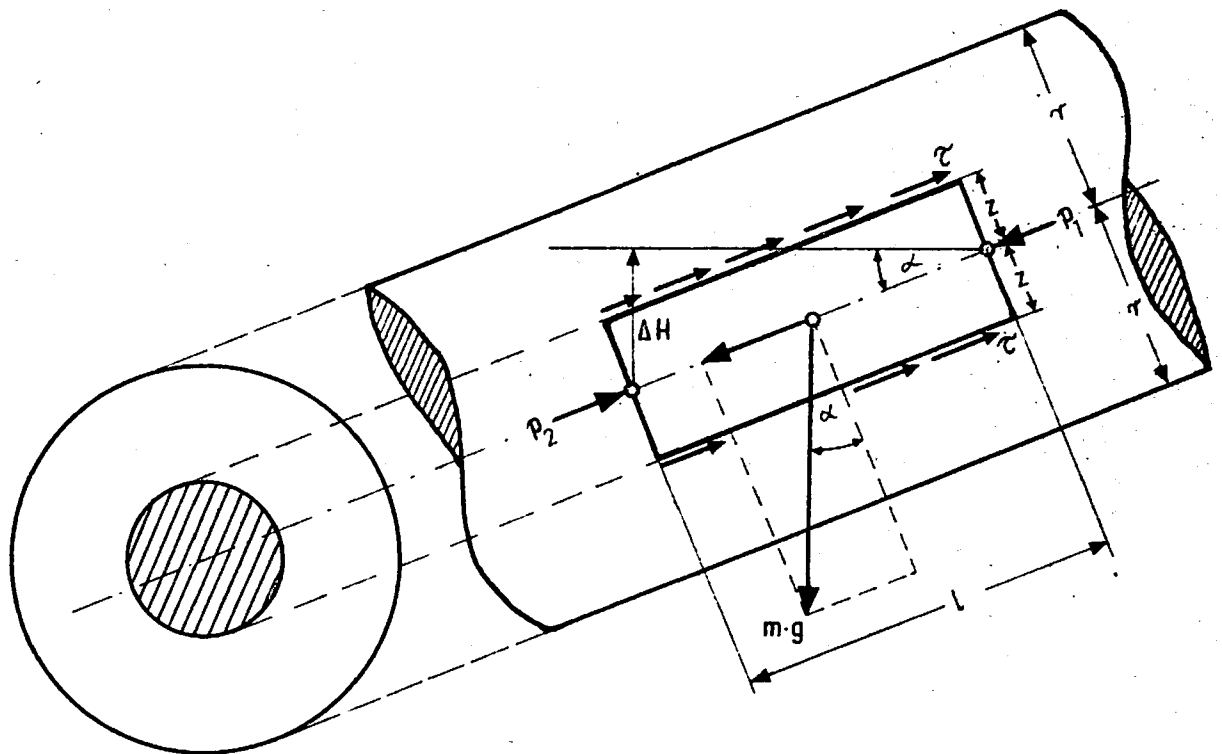


Bild 2
 Schema eines Porenkanals

Kraftgleichgewicht gemäß Bild 2
 Beschleunigende Kraft in Richtung Rohrachse

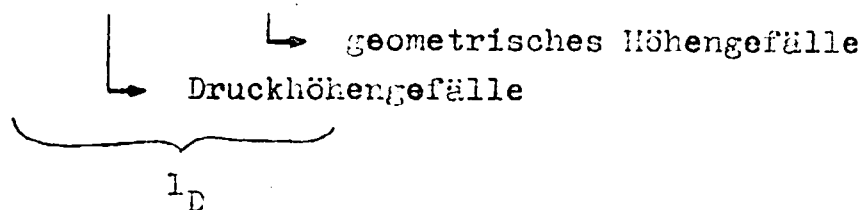
$$P = \pi z^2 p_1 + m \cdot g \cdot \sin \alpha - \pi z^2 p_2$$

$$\text{mit } m \cdot g = \gamma \cdot V$$

$$\text{und } \sin \alpha = \frac{\Delta H}{l}$$

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha = \gamma \cdot V \cdot \frac{\Delta H}{l} = \gamma \cdot \pi z^2 l \cdot \frac{\Delta H}{l}$$

$$P = \pi z^2 \cdot \gamma \cdot l \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma \cdot l} + \frac{\Delta H}{l} \right) \quad (8)$$



Bremsende Kraft (Widerstand) infolge innerer Reibung der Flüssigkeit

$$T = A_M \cdot \tau$$

A_M - Zylindermantelfläche

$$A_M = 2 \pi z \cdot l$$

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dz} \quad \text{Schubspannung}$$

(Elementargesetz der Flüssigkeitsreibung)

$$T = 2 \pi z l \cdot \eta \cdot \frac{dv}{dz} \quad (9)$$

Für stationäre Strömung muß die Summe der angreifenden äußeren Kräfte gleich Null sein, d. h.

$$P + T = 0$$

aus Gleichung (8) und (9) folgt

$$z \cdot \gamma \cdot I_D + 2 \eta \frac{dv}{dz} = 0$$

Durch Integration über den Rohrquerschnitt ergibt sich

$$\frac{dv}{dz} = - \frac{z \cdot \gamma \cdot I_D}{2 \eta}$$

$$dv = - \frac{\gamma \cdot I_D}{2 \eta} \cdot z \, dz$$

$$v = - \frac{\gamma \cdot I_D \cdot z^2}{4 \eta} + C \quad (10)$$

Für zähe Flüssigkeiten ist an der Rohrwandung $z = r$
die Geschwindigkeit $v = 0$

$$c = \frac{\gamma \cdot I_D \cdot r^2}{4 \eta}$$

$$v = \frac{\gamma \cdot I_D}{4 \eta} (r^2 - z^2) \quad (11)$$

Durchfluß

$$dQ = v \cdot dF$$

$$= \frac{I_D \cdot g}{4 \nu} (r^2 - z^2) \cdot 2\pi z \, dz = \frac{\pi I_d g}{2 \nu} (r^2 z - z^3) \, dz$$

Durch Integration folgt das Gesetz von HAGEN-POISEUILLE:

$$Q = \frac{\pi I_D g}{2 \nu} \int_{z=0}^{z=r} (r^2 z - z^3) \, dz = \frac{\pi \cdot I_d \cdot g \cdot r^4}{8 \nu} = \frac{\pi \cdot I_d \cdot g \cdot d^4}{128 \nu} \quad (12)$$

Hieraus ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit zu

$$v_m = \frac{Q}{F} = \frac{I_d \cdot g \cdot r^2}{8 \nu} = \frac{I_d \cdot g \cdot d^2}{32 \nu} \quad (13)$$

$$\text{und } I = \frac{32 \nu \cdot v_m}{g \cdot d^2} = \frac{8 \nu \cdot v_m}{g r^2} \quad (14)$$

Aus der Energiegleichung

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_2 + h_v \quad (15)$$

gilt für gleichbleibenden Rohrdurchmesser
nach Kontinuitätsgesetz

$$v_1 \cdot F_1 = v_2 \cdot F_2 \implies v_1 = v_2$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma \cdot l} + \frac{H_1 - H_2}{1} = \frac{h_v}{1}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{I_D} = \frac{h_v}{1}$$

Reibungsverlust

$$h_v = I_D \cdot l = v_m \cdot \frac{32 \nu l}{g d^2}$$

durch Umformen und Erweitern mit $2 v_m$

$$h_v = 64 \cdot \frac{\nu}{v_m \cdot d} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_m^2}{2g} \quad (16)$$

$$h_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_m^2}{2g} \quad (17)$$

$$\text{mit } Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

für laminare Strömung ist
Widerstandswert

$$\lambda = 64/Re$$

Betrachtung der Filterströmung

Zur Übertragung der Gesetze der Rohrhydraulik auf die Belange der Filterströmung werden folgende Annahmen getroffen:

- a) Der Rohrdurchmesser (bzw. -radius) wird durch den hydraulischen Radius r_h ersetzt:

$$r_h = \frac{F}{U} = \frac{\pi/4 d^2}{\pi \cdot d} = \frac{d}{4} \implies \underline{d = 4 r_h} \quad (18)$$

Für den Durchmesser der Porenkanäle ergibt sich r_h in Abhängigkeit eines äquivalenten wirksamen Korn-(Kugel-)durchmessers d_w zu

$$r_h = \frac{F}{U} \cdot \frac{s}{s} = \frac{V_P}{F_O}$$

V_P - Porenvolumen

F_O - Kornoberfläche
(innere Oberfläche)

s - Strömungsweg

$$\frac{V - V_F}{V_F} = \epsilon = \frac{n}{1 - n}$$

ϵ - Porenziffer

V - Gesamtvolumen der Probe

V_F - Volumen der Festmasse

$$V_P = V - V_F = \frac{n}{1-n} \cdot V_F$$

$$V_F(\text{Kugeln}) = \frac{\pi d_w^3}{6} \cdot a$$

a - Anzahl der Kugeln je Probe

$$F_0 = \pi d_w^2 a$$

$$r_h = \frac{n}{1-n} \cdot \frac{\pi \cdot d_w^3 \cdot a}{6} \cdot \frac{1}{\pi d_w^2 a}$$

$$\underline{r_h = \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_w}{6}} \quad (19)$$

- b) Die Rohrlänge l wird durch eine mittlere Länge der Porenkanäle l_p ausgedrückt, die im statistischen Mittel um etwa $\sqrt{2}$ mal länger als die Filterlänge l_f ist

$$\underline{l_p = \sqrt{2} l_f \hat{=} l} \quad (20)$$

- c) Anstelle der mittleren Durchflußgeschwindigkeit v_m setzt man die mittlere Porengeschwindigkeit v_p , die sich unter Verwendung der Filtergeschwindigkeit v_f wie folgt aus der Kontinuitätsgleichung berechnen läßt:

$$v_p \cdot F_{\text{ges}} = v_f \cdot F_p$$

F_{ges} - Durchflußfläche des Filters

F_p - mittlerer Porenkanalquerschnitt

$$v_p = \frac{v_f \cdot F_{\text{ges}}}{F_p} \hat{=} v_m$$

$$\text{mit } V_{\text{ges}} = F_{\text{ges}} \cdot l_f; \quad F_{\text{ges}} = \frac{V_{\text{ges}}}{l_f}$$

$$V_p = F_p \cdot l; \quad F_p = \frac{V_p}{l}$$

$$v_P = v_F \cdot \frac{V_{ges}}{V_P} \cdot \frac{l}{l_F}$$

$$\text{mit } n = \frac{V_P}{V_{ges}} \quad (\text{Porenanteil})$$

$$\text{und } l = \sqrt{2} \cdot l_F \quad (\text{siehe b))}$$

$$\underline{v_P = \frac{v_F}{n} \cdot \sqrt{2} \hat{=} v_m} \quad (21)$$

Aus Gleichung (16) ergibt sich nun

$$h_U = \frac{4 \cdot \nu \cdot l_F \cdot v_F}{r_h^2 \cdot g \cdot n} \quad \text{mit Gleichung (19)}$$

$$h_U = \frac{4 \cdot \nu \cdot l_F \cdot v_F (1-n)^2 \cdot 36}{g \cdot d_w^2 \cdot n^3}$$

$$h_U = 144 \cdot \frac{\nu}{g} \cdot \frac{v_F}{d_w^2} \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot l_F \quad (22)$$

(HACKESCHMIDT (1969) erweitert diese Gleichung zur Berücksichtigung nichtkreisförmiger Querschnitte und Krümmungen der Strombahnen noch mit einem Formfaktor von 1,22.)

$$\text{mit } I_D = \frac{h_U}{l}$$

$$v_F = 0,01 \cdot \frac{g}{\nu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_w^2 \cdot I_D = k \cdot I_D \quad (23)$$

Abhängigkeiten des k-Wertes

Gleichung (23) stellt das DARCY-Gesetz für lineare (laminare) Filterströmung dar. Zur Bestimmung des k-Wertes kann die Gleichung in verschiedener Weise interpretiert werden.

$$k = \frac{v_F}{I_D} = \frac{Q \cdot l}{F_{ges} \cdot h_r} \quad \text{mit } v_F = \frac{Q}{F_{ges}} \quad (24)$$

Eine Definition des k-Wertes anhand petrophysikalischer Größen kann wie folgt geschehen:

$$k = 0,01 \cdot \frac{g}{\nu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_w^2 = C \cdot f(n) \cdot d_w^2 \quad (25)$$

Diese Gleichung ist die Grundgleichung für zahlreiche, von verschiedenen Autoren aufgestellte Formeln zur Ermittlung des k-Wertes aus Porosität und Korndurchmesser. Gleichzeitig rechtfertigt sie theoretisch die erstmalig von HAZEN empirische gefundene Beziehung, laut der der k-Wert dem Quadrat der wirksamen Korngröße proportional ist.

Die vorangegangenen Ableitungen erfolgten unter Annahme eines Korngemisches aus einheitlichen Kugeln vom wirksamen Durchmesser d_w . Um ein beliebiges aus vielen Korngrößen aufgebautes natürliches Gesteinsmaterial durch eine völlig gleichmäßige Korngröße d_w zu beschreiben, wurde als wirksame Korngröße ein mittlerer äquivalenter Kugeldurchmesser eines Einkorngemisches definiert, der die gleiche spezifische Oberfläche hat wie das Vielkorngemisch.

Dieser wirksame Korndurchmesser wird nach KOZENY angegeben zu

$$\frac{1}{d_w} = \sum_i \frac{x_i}{d_i} \quad (26)$$

mit x_i - relativer Gewichtsanteil der Fraktion

$$\sum x_i = 1 (= 100 \%)$$

d_i - mittlerer Korndurchmesser der Fraktion (Sieböffnung)

i - Nummer der Fraktion aus der Siebanalyse

(HACKESCHMIDT erweitert diese Gleichung noch mit einem geometrischen Formfaktor der Fraktion $\alpha \approx 1,3 \dots 1,5$.)

HAZEN setzt generell als wirksame Korngröße $d_w = d_{10} \%$. Diese Annahme wird allerdings von BEYER korrigiert, indem er feststellt, daß - je nach Größe des Ungleichförmigkeitsgrades U - d_w mehr als das 2,5fache von d_{10} betragen kann (siehe Tabelle 2).

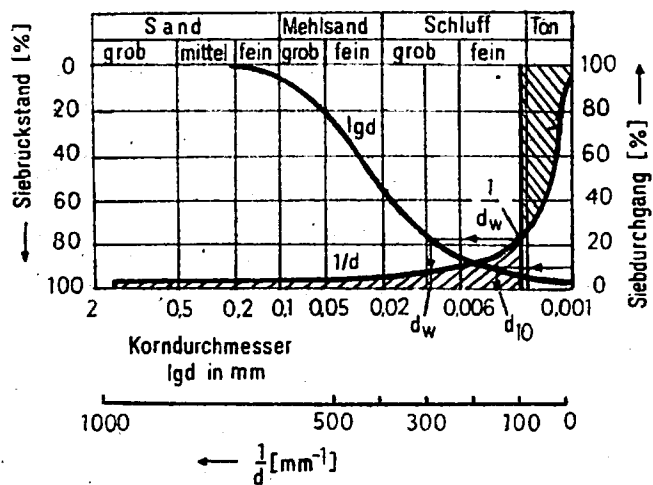


Bild 3

Ermittlung der wirksamen Korngröße (nach KOZENY)

Tabelle 2

$U = d_{60}/d_{10}$	d_w/d_{10}
1,0 ... 1,9	1,0 ... 1,6
2,0 ... 2,9	1,6 ... 1,9
3,0 ... 4,9	1,9 ... 2,2
5,0 ... 9,9	2,2 ... 2,5
> 10	> 2,5

Eine einfache Bestimmung von d_w kann nach KOZENY graphisch erfolgen, indem man zu der Kornverteilungskurve die Kurve mit den reziproken Werten $1/d$ senkrecht zur %-Skala aufzeichnet (Bild 3). Für gleiche Flächen unter der $1/d$ -Kurve ergibt sich bei Projektion der Schnittpunkte auf die Kornverteilungskurve die gesuchte Größe d_w .

ENGELHARDT (1960) stellt Gleichung (23) in Abhängigkeit der inneren Oberfläche F_0 bzw. der spezifischen Oberfläche

$$O = \frac{F_0}{V_t} = c \cdot \frac{1}{d_w} \quad \text{um und erhält die KOZENY-CARMAN-Beziehung}$$

$$k = 200 \cdot \frac{1}{O^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (27)$$

k in (m/s)

O in (cm^{-1})

$c \approx 5$ (nach Versuchen von ENGELHARDT)

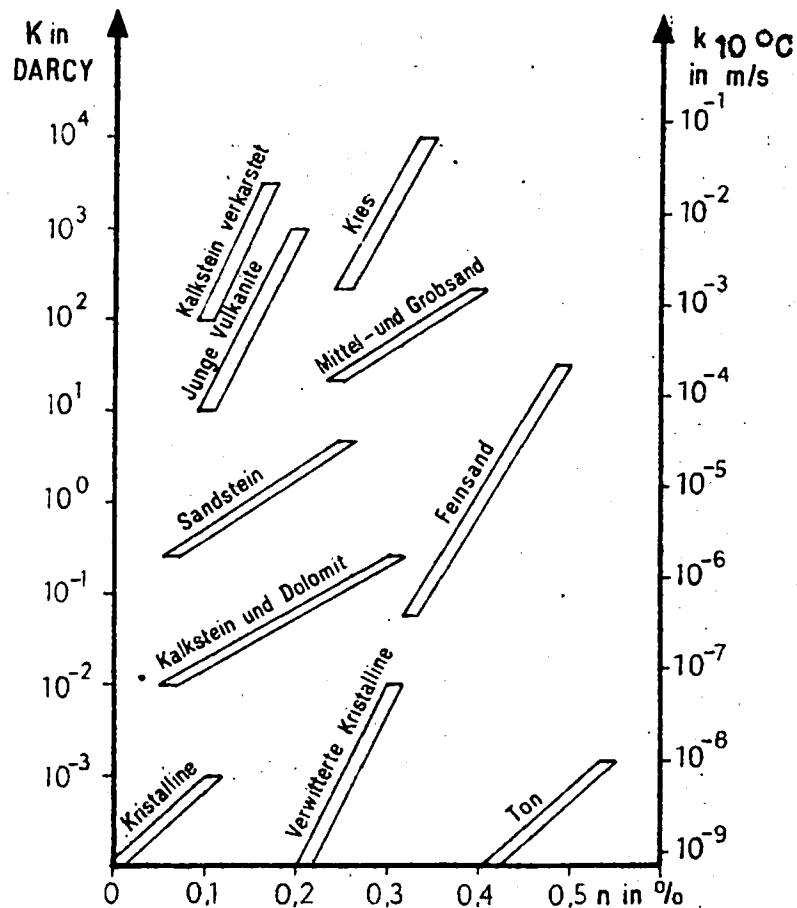


Bild 4 Abhängigkeit des Porenanteils von der Durchlässigkeit für verschiedene Gesteine nach CHOUKER (1971)

(O ist die Summe der Oberflächen der Teilchen eines Gesteins je Raumeinheit in cm^2/cm^3 ; nach ZUNKER (1951) hängt die Durchlässigkeit wesentlich von der spezifischen Oberfläche ab.)

Gelegentlich wurde versucht, den k -Wert direkt aus der Porosität zu ermitteln. Wie u. a. ENGELHARDT (1951, 1973) feststellte, besteht jedoch keine einfache Beziehung zwischen k und n , da die Porosität den gesamten Porenraum erfasst, die Permeabilität aber von der Gestalt der einzelnen durchströmten Porenkanäle abhängt. In Bild 4 ist ersichtlich, daß für verschiedene Gesteinsarten gravierende Unterschiede in der Durchlässigkeit in Verbindung mit nur geringfügig abweichenden Porenanteilen n auftreten können (z. B. Ton/Feinsand).

Eine bessere funktionelle Abhängigkeit des k -Wertes ist zum entwässerbaren Porenanteil n_0 zu erwarten und wurde von GOLF (1965) sowie BEYER/SCHWEIGER (1969) empirisch ermittelt (Bilder 5 und 6).

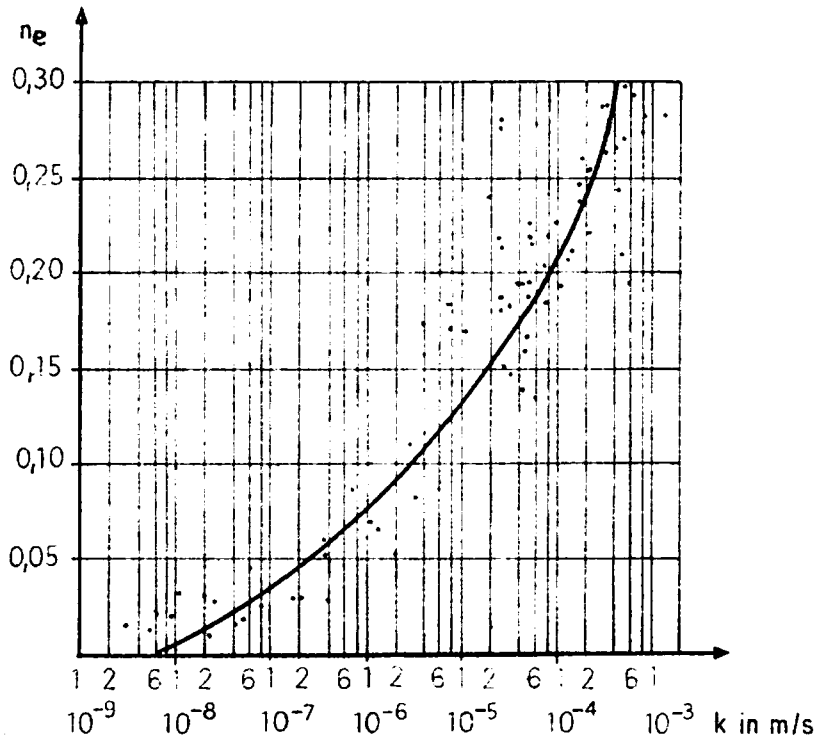


Bild 5

Beziehung zwischen Lufthaltewert (entwässerbarer Porenanteil) und k -Wert nach GOLF (1965)

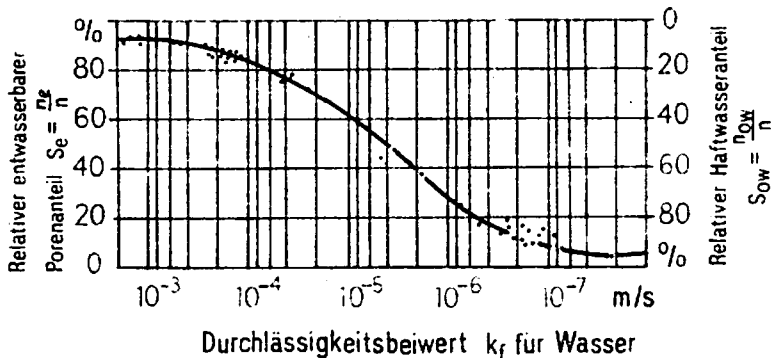


Bild 6

Abhängigkeit des relativen entwässerbaren Porenanteils vom Durchlässigkeitsbeiwert nach BEYER/SCHWEIGER (1969)

Infolge besonders genetisch und stratigraphisch bedingter vielfacher Einflüsse auf die Beschaffenheit der Lockergesteine (Korngröße, -form, -anordnung usw.) ist eine einheitliche und vollständige mathematische Beschreibung der Geometrie der Poren bzw. Porenkanäle für Materialien verschiedener Herkunft kaum zu erwarten, und man beschränkt sich deshalb auf Modellvorstellungen entsprechend der vorangegangenen Ableitungen, die ggf. durch

empirische Formfaktoren präzisiert werden.

Als maßgebenden petrophysikalischen Parameter für die Charakterisierung der Durchlässigkeit dient hierbei die Korngröße bzw. die spezifische Oberfläche, und es wird vielfach auf eine Einbeziehung der Porosität entsprechend Gleichung (25) verzichtet (vgl. BEYER, HAZEN):

$$k = c \cdot d_w^2 \quad (28)$$

Der Einfluß der Lagerungsdichte auf die Größe des k-Wertes ist erheblich. So können nach Untersuchungen von BEYER (1964) und CHARDABELLAS (1964) Abweichungen bei lockerster und dichtester Lagerung von 50 bis > 100 % auftreten. Dieser insbesondere bei laborativen k-Wert-Bestimmungen interessierende Sachverhalt wird durch entsprechende versuchsmethodische Maßnahmen berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang sind auch die aus der unterschiedlichen Entstehung der Gesteine resultierenden Inhomogenitäten, Schichtungen und anderen Faziesänderungen zu sehen, die z. T. grundlegenden Einfluß auf den k-Wert haben und dazu führen, daß der Gesteinsraum meist heteropermeabel ist. Eine quantitative Erfassung derartiger Sachverhalte ist meist kompliziert und hat oft eine erhebliche Erhöhung des Aufwandes (auch bezüglich der Auswertung) zur Folge (siehe auch 3.2.6.).

3.1.2. Einfluß der Wasserbeschaffenheit

Wie aus den Gleichungen (2), (9) bzw. (23) ersichtlich, muß infolge innerer Reibung des Grundwassers die dynamische Viskosität μ bzw. die daraus ableitbare kinematische Viskosität ν bei der Ermittlung des k-Wertes beachtet werden. Gemäß Bild 8 sind die Größe der Viskosität ν (bzw. μ) und damit auch der Durchlässigkeit von der Temperatur T der Flüssigkeit abhängig. (Da die Dichte des Wassers zwischen 0,98 und 1,02, i. M. bei 1 liegt, sind für Wasser die Zahlenwerte von ν und μ nur geringfügig voneinander abweichend.)

Der Zusammenhang zwischen μ und T kann auch näherungsweise durch Gleichung (29) dargestellt werden:

$$\mu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 T + 0,000221 T^2} \quad (29)$$

μ in Poise
T in °C

Die Temperatur des natürlichen Grundwassers schwankt im mitteleuropäischen Raum zwischen 7 °C und 11 °C, und in Tiefen von 20 - 30 m besitzt es eine fast konstante Temperatur von 9 - 10 °C. Jahreszeitliche Schwankungen sind i. allg. gering und liegen um 1 - 2 °C. Generell wird deshalb der k-Wert auf eine Temperatur von 10 °C bezogen. Erforderliche Umrechnungen auf andere Temperaturen T erfolgen nach der Beziehung

$$\frac{k_{10 \text{ °C}}}{k_T} = \frac{\mu_T}{\mu_{10 \text{ °C}}} = \frac{\nu_T}{\nu_{10 \text{ °C}}} \quad (30)$$

oder überschläglich

$$k_{10 \text{ °C}} = \frac{1}{(0,7 + 0,03 T)} \cdot k_T \quad (31)$$

Bisher kaum beachtet wurde die zusätzliche Abhängigkeit der Viskosität von der Mineralisation des Wassers, also von chemischen Inhaltsstoffen, wie in Bild 7 dargestellt ist. Da die Mineralisation der für Wasserversorgungszwecke allgemein interessierenden Grundwässer relativ gering ist, kann allerdings in den meisten praktischen Fällen der Chemismus des Wassers hinsichtlich seines Einflusses auf den k-Wert vernachlässigt werden.

Der Einfluß unterschiedlicher Zähigkeit auf den k-Wert zeigt sich natürlich auch bei Untersuchungen für andere Strömungsmittel (X) als Wasser.

Bezogen auf eine Wassertemperatur von 20 °C und aus der Beziehung

$$k_{X(20)} = k_{(20)} \frac{\nu_{20}}{\nu_X} \quad (30a)$$

gibt z. B. BEYER (1965) die in Tabelle 3 dargestellten relativen Durchlässigkeiten k_X/k an.

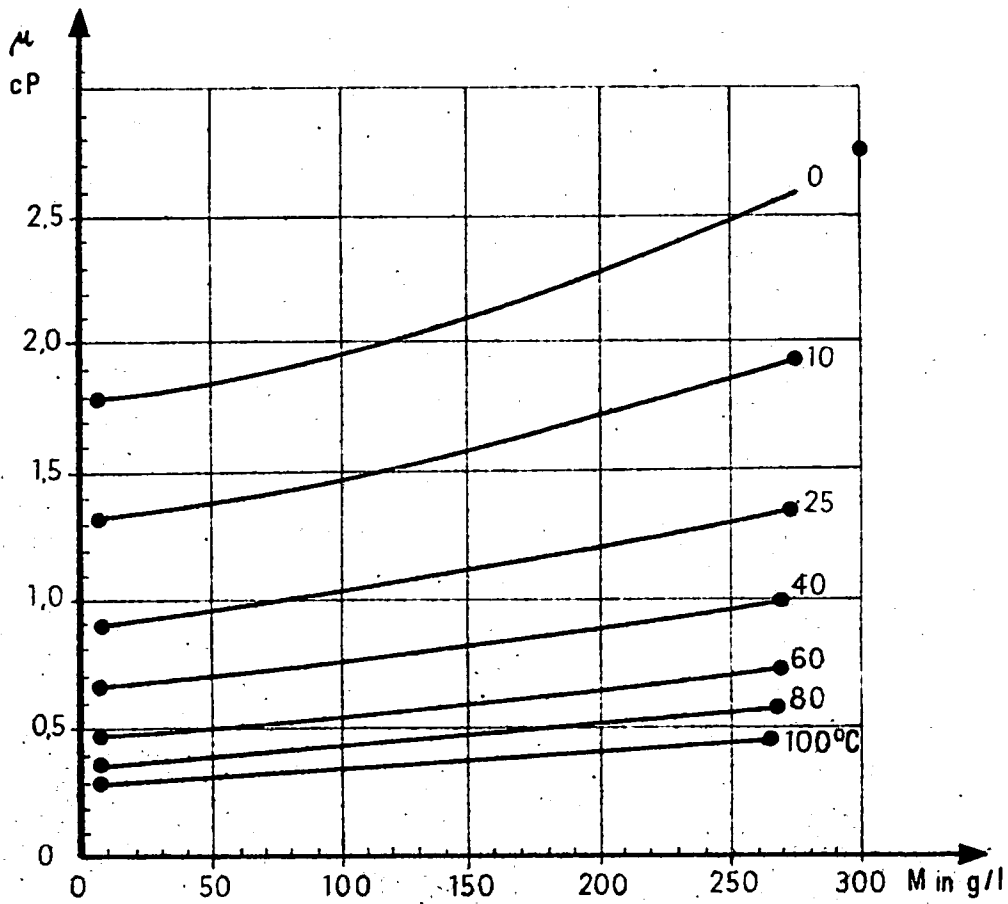


Bild 7 Abhängigkeit der Zähigkeit μ des Wassers von Temperatur und Mineralisation M (für NaCl-Lösungen) nach KERKIS (1975)

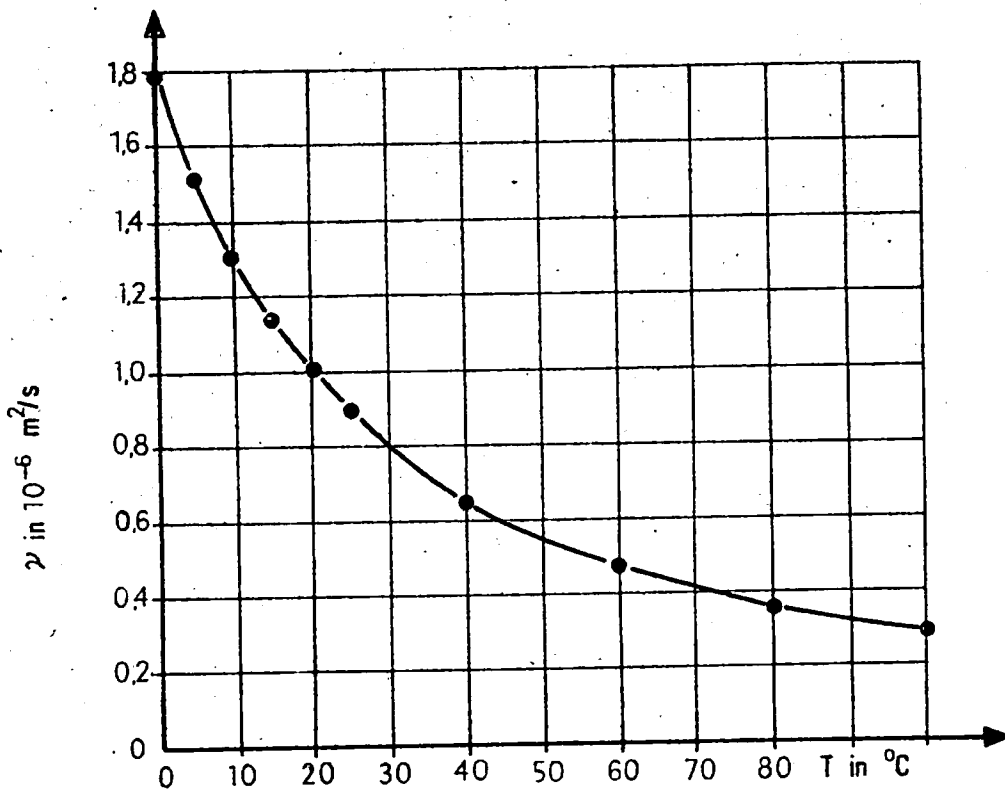


Bild 8 Kinematische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur des Wassers

Tabelle 3: Relative Durchlässigkeitsbeiwerte nach BEYER (1965)

Flüssigkeit	ν in (10^{-2} cm ² /s)	relative Durchlässigkeit
Wasser	1,0	1,0
Benzin	0,6 ... 1,2	1,67 ... 0,83
Diesel	3 ... 6	0,33 ... 0,17
Rohöl	5 ... 100	0,2 ... 0,01
Heizöl (leicht)	15 ... 50	0,07 ... 0,02
Heizöl (schwer)	100 ... 500	0,01 ... 0,002

3.2. Einfluß des Filtrationsprozesses resp. Wechselwirkungen zwischen Gestein und Wasser

In der praktischen Grundwassererkundung setzt man für Strömungsuntersuchungen im laminaren Bereich die Gültigkeit des DARCY-Gesetzes für lineare Filterströmung voraus, da für die üblichen Strömungsverhältnisse das Gefälle (der Druckabfall) direkt proportional der Filtergeschwindigkeit ist. In diesem Zusammenhang wird der k-Wert auch als linearer Durchlässigkeitsbeiwert bezeichnet.

Infolge unterschiedlicher Einflüsse auf Milieuzustand und Strömungsprozeß gilt diese Proportionalität nicht in jedem Falle, und es ergibt sich für nichtlineare Filterströmung die Notwendigkeit, das DARCY-Gesetz bzw. den k-Wert zu modifizieren. Allerdings besteht ein relativ breiter Übergangsbereich, so daß sich die Gültigkeitsgrenzen des DARCY-Gesetzes kaum scharf formulieren lassen.

3.2.1. Hydraulischer Gradient und Filtergeschwindigkeit

Aus der schematischen Darstellung der Strömungsbereiche in Bild 9 sind gewisse Gefällebereiche ersichtlich, für die eine wesentliche abhängige Veränderlichkeit von k auftritt. Eine diesbezügliche Quantifizierung wurde anhand empirischer Untersuchungen von verschiedenen Autoren vorgenommen. ZUNKER (1951) stellte für Glaskugeln innerhalb des laminaren Bereiches eine mehr oder weniger starke Zunahme der Durchlässigkeit (i. M. 8 %) bis zu einem Wendepunkt, dem kritischen Gefälle I_{krit} , fest, von dem an eine Abnahme des k-Wertes bei allmählichem Übergang zu turbulenter Strömung erfolgt (Bild 12).

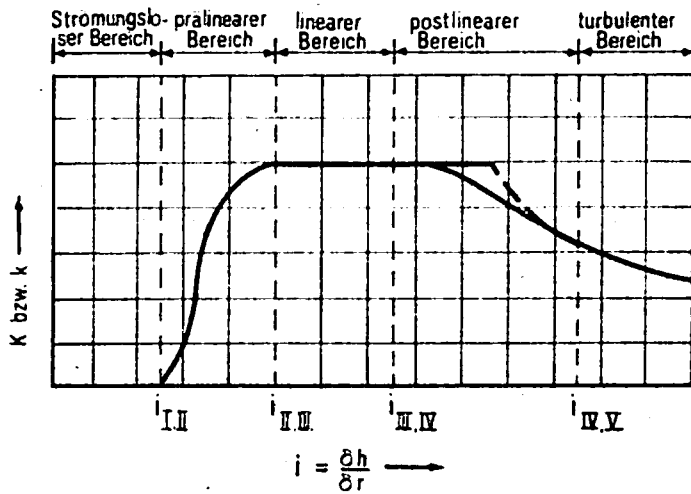


Bild 9
Schematische Darstellung der Strömungsbereiche nach BUSCH/LUCKNER (1972)

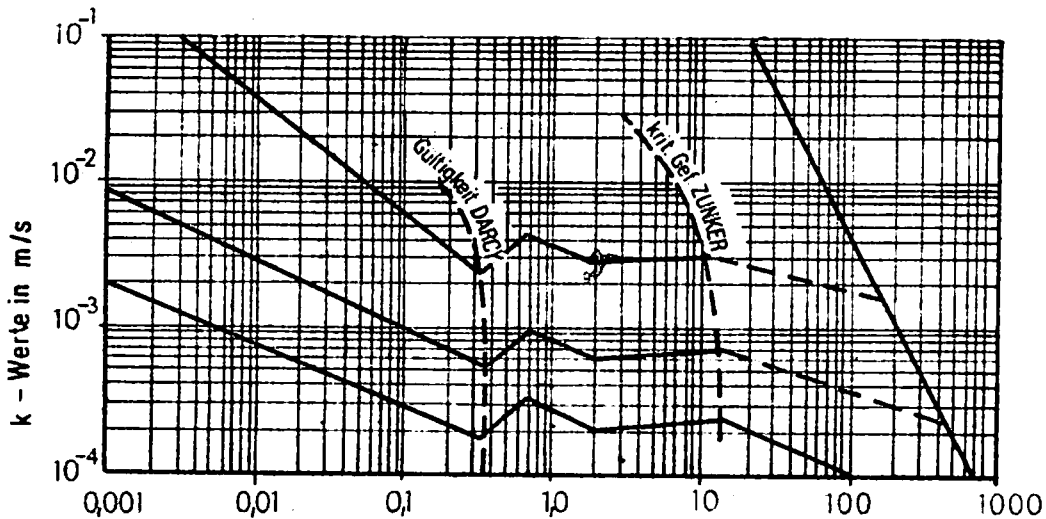


Bild 10
Abhängigkeit zwischen k-Wert und Gefälle bei den Pumpversuchen nach SCHNEIDER (1973)

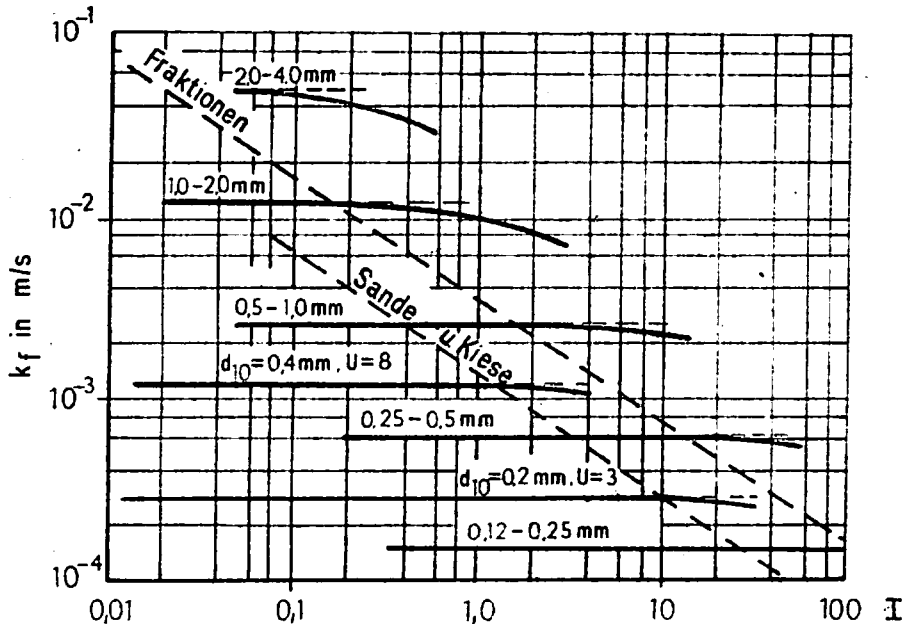


Bild 11
Abweichungen vom linearen Filtergesetz nach BEYER (1967)

Analoge Laboruntersuchungen von BEYER (1964) an verschiedenen natürlichen Materialien und für Gefälle zwischen 0,001 und 10,0 bestätigten diese Abnahme des k-Wertes von einem bestimmten kritischen Gefälle an, wobei I_{krit} um so niedriger liegt je größer die Fraktionen sind bzw. je größer die Durchlässigkeit ist (Bild 11). Allerdings wurde von BEYER in den niedrigen Gefällebereichen keine Veränderlichkeit von k ermittelt. Nach BEYER beträgt das kritische Gefälle empirisch für Sande und Kiese

$$I_{krit} = \frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{k^{3/2}} \quad (32)$$

Z. T. analoge Ergebnisse teilt SCHNEIDER (1973) in Zusammenhang mit Pumpversuchsauswertungen (nach THIEM) mit. Generell stellte er hierbei unterschiedliche K-Werte bei unterschiedlicher Beanspruchung fest, d. h. bei Veränderung von Förderstrom und Absenkung und damit von Gefälle und Geschwindigkeit. Desgleichen werden abweichende k-Werte in verschiedenen Entfernungen vom Brunnen, also ebenfalls bei Gefälleänderung, registriert.

SCHNEIDER kommt zu folgenden Schlußfolgerungen (Bilder 10 und 13):

- Im Gefällebereich $< 0,3 \%$ nimmt k mit abnehmendem Gefälle zu (Bilder 10 und 13 im Gegensatz zu den Bildern 9 und 12);
- starker Wechsel von Zu- und Abnahme des k-Wertes mit ausgeprägtem Maximum bzw. ausgeprägter Unstetigkeitsstelle zwischen 0,3 und 2 %;
- im Bereich $I \approx 2 \dots 12 \%$ tritt keine wesentliche k-Wert-Änderung auf ($k \approx const.$); lediglich bei Feinsanden schwach zunehmende k-Werte mit wachsendem Gefälle;
- abnehmende k-Werte mit zunehmendem Gefälle oberhalb der kritischen Gefällegrenze nach ZUNKER.

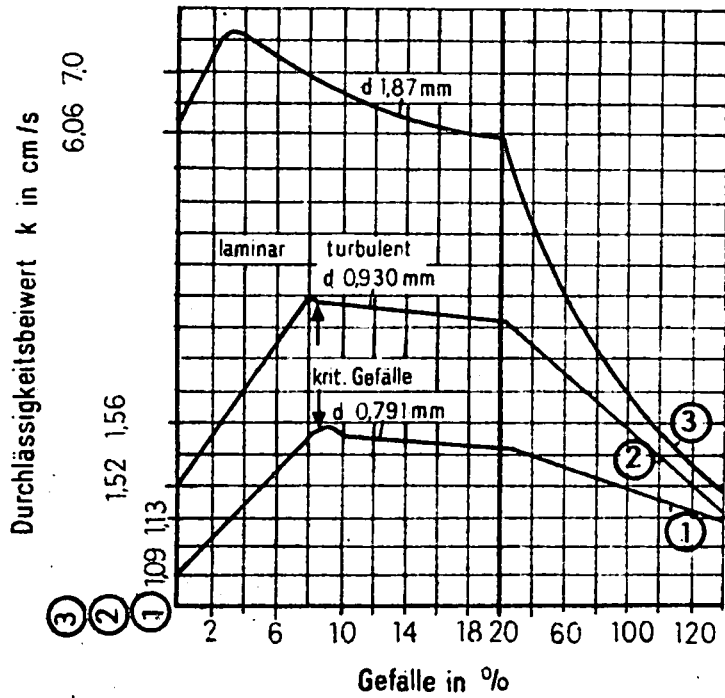


Bild 12

Beziehung zwischen k -Wert und Gefälle bei Glasschrot nach F. ZUNKER (1951)

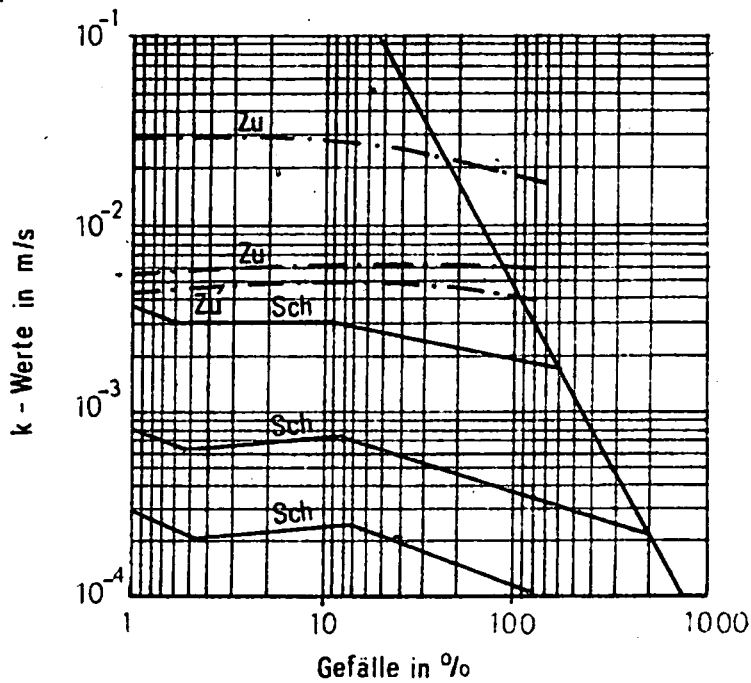


Bild 13

Zusammenhänge zwischen k -Werten und Gefällen (nach SCHNEIDER und ZUNKER)

In Bild 14 wurden Veränderungen des k-Wertes in Abhängigkeit vom Abstand des Versuchsbrunnens dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, daß in Brunnennähe für größeren Förderstrom größere k-Werte ermittelt werden (Kurven 1 bis 3). Außerdem findet von einer gewissen Entfernung an eine Vergrößerung von k mit wachsendem Abstand (Gefälleverringering) statt. Dieser Sachverhalt wird auch durch Auswertungen nach anderen Verfahren von UBELL bestätigt (Bild 15). Allerdings bemerkt UBELL in diesem Zusammenhang, daß diese Tatsache nicht Grund sein kann, k als veränderliches Charakteristikum anzusehen. Er sieht vielmehr die Ursachen in der unvollständigen Widerspiegelung der tatsächlichen Strömungsverhältnisse durch die verwendeten Berechnungsmethoden.

Die natürlichen Gefälleverhältnisse für die Grundwasserlagerstätten im Lockergesteinsbereich der DDR liegen nach Tab. (Anl. 2.2.) etwa zwischen 0,1 und 0,5 %, in einigen Lagerstättentypen bis 5 %. Für den zur Auswertung bevorzugten "mittleren Absenkungsbereich" bei Pumpversuchen treten i. allg. Gefälle unter 10 % auf. Daraus ergibt sich für normale hydrogeologische Bedingungen in der überwiegenden Anzahl praktischer Fälle die Möglichkeit der Annahme eines linearen Durchlässigkeitsbeiwertes.

Treten gelegentlich wesentlich größere hydraulische Gradienten bzw. ein Übergang zu turbulenter Strömung auf, kann eine damit verbundene Nichtlinearität der Filterströmung nach HACKESCHMIDT (1969) durch einen quadratischen Filterwiderstandsbeiwert k_q berücksichtigt werden:

$$k_q = 100 (1 - n) \frac{\nu}{d_w} \quad (33)$$

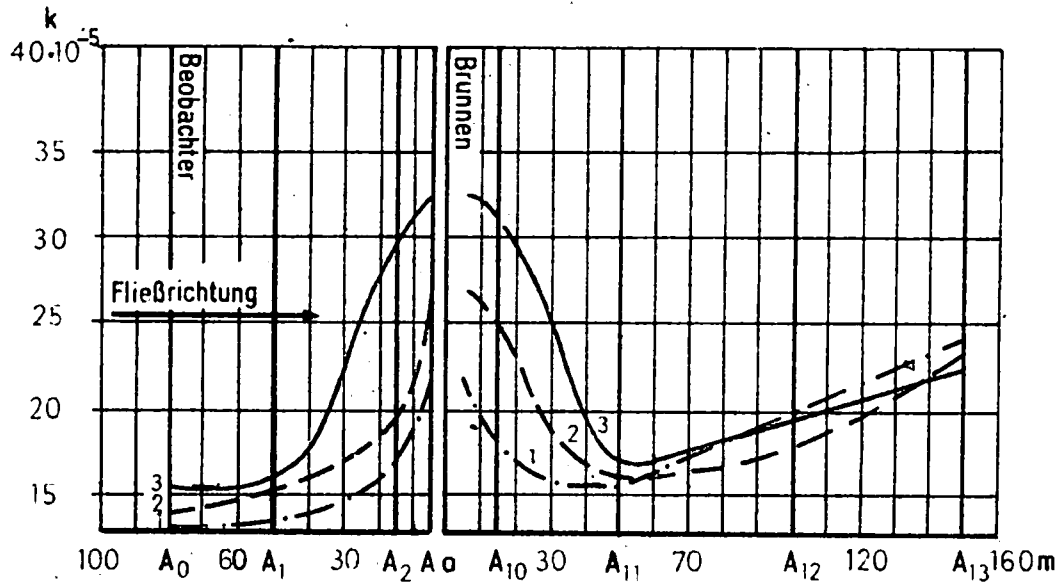


Bild 14

Veränderung der k-Wert-Verteilung bei verschiedenen Belastungsstufen; 1 geringe, 2 mittlere, 3 hohe Belastung des Brunnens nach SCHNEIDER (1973)

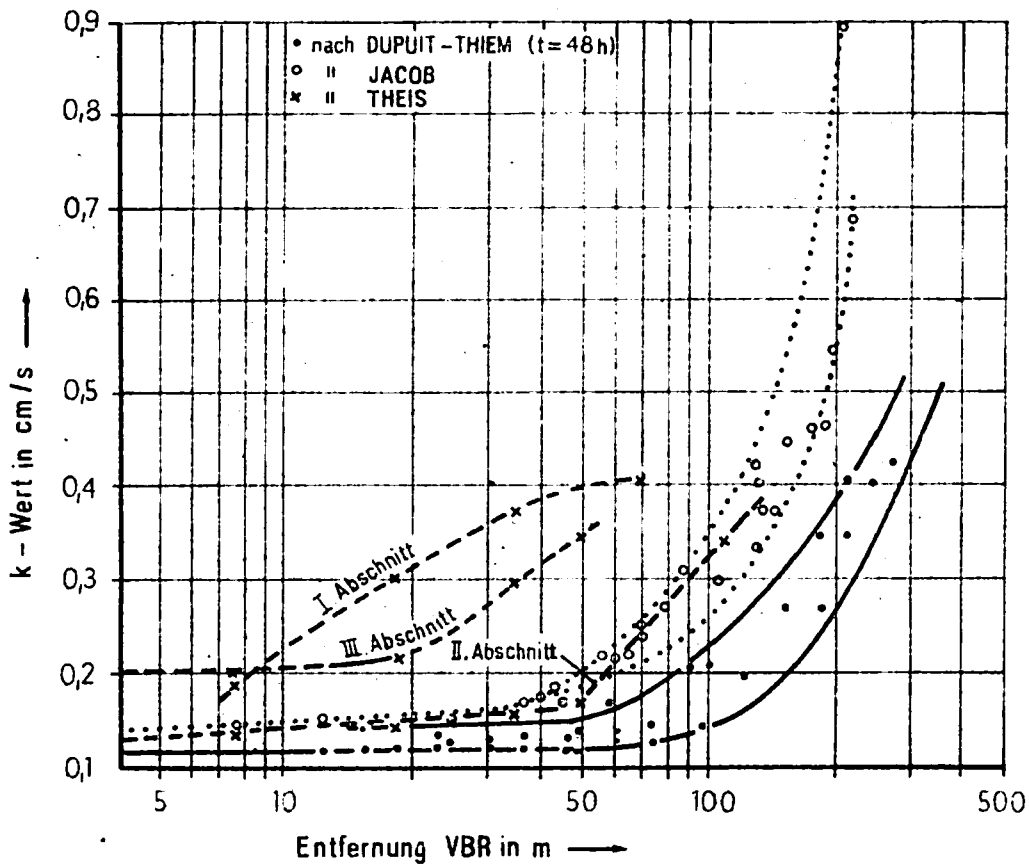


Bild 15

Änderung des mit verschiedenen Methoden berechneten k-Wertes in Abhängigkeit von der Entfernung des Meßpunktes vom Versuchsbrunnen (nach UBELL)

3.2.2. Mehrphasenströmung

Die Gültigkeit des DARCY-Gesetzes geht von einer gesättigten Grundwasserströmung aus, d. h. einem Filterkörper, dessen Poren (Klüfte) voll wassererfüllt sind. Man spricht von einer Zweiphasenströmung (Gestein/Wasser). Treten eine oder ggf. mehrere Phasen hinzu (z. B. Luft, Öl), so entsteht eine Drei- oder Mehrphasenströmung, die eine entsprechende Motivierung des DARCY-Gesetzes erfordern.

Am häufigsten tritt dieser Fall bei ungesättigter Filterströmung (Wasser/Luft/Korngerüst) beispielsweise in der Aerationzone in Verbindung mit Versickerungsvorgängen, im Kapillarsaum, aber auch bei Entwässerungsmaßnahmen auf. Nach BEYER/SCHWEIGER (1969) ist der Durchlässigkeitsbeiwert in dieser ungesättigten Zone in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad niedriger als bei vollständiger Wassersättigung. Als Sättigungsgrad gilt hierbei die Beziehung

$$s_w = \frac{n_w}{n} = \frac{w_n \cdot \gamma_G}{\epsilon} \quad (34)$$

- s_w - Sättigungsgrad, Wasser
- n_w - wassergefüllter Porenraum
- n - Gesamtporenraum
- w_n - mittlerer Wassergehalt
- γ_G - spezifisches Gewicht des Gesteins
- ϵ - Porenziffer

Der für dieses Strömungssystem effektive Durchlässigkeitsbeiwert k_g kann in Beziehung zu s_w und k dargestellt werden (Bild 16). Das Verhältnis von

$$k_g/k = k_r \quad (35)$$

wird auch als relative Durchlässigkeit (bezogen auf gesättigte Wasserströmung) bezeichnet. Es sei noch darauf hingewiesen, daß bei dieser Betrachtung auch von Interesse ist, ob es sich um eine Be- oder Entwässerung handelt, d. h., ob das Wasser die Luft verdrängt oder umgekehrt. Wie aus Bild 17 ersichtlich, können demnach einer bestimmten Sättigung jeweils zwei Durchlässigkeitsbeiwerte entsprechen (vgl. BUSCH/LUCKNER (1972)).

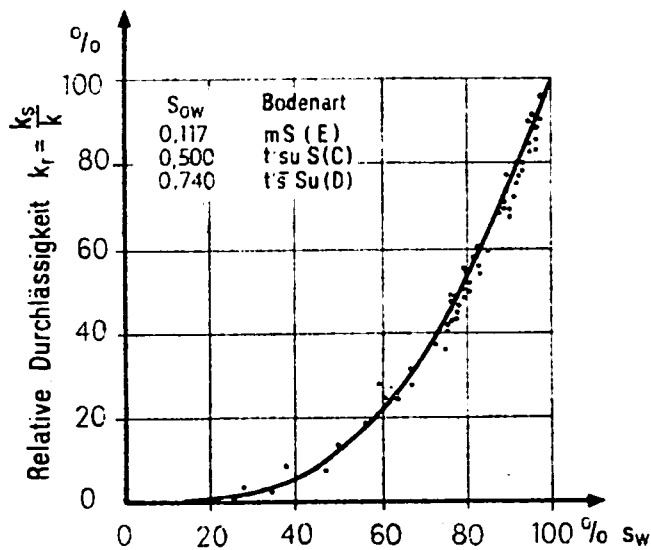


Bild 16

Relative Durchlässigkeit des Dreiphasensystems "Boden-Wasser-Luft" nach BEYER/SCHWEIGER (1969)

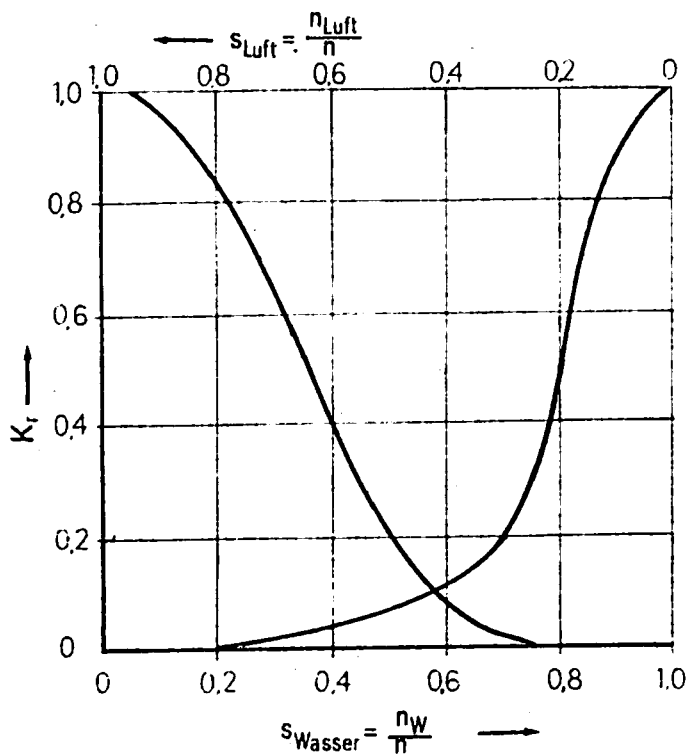


Bild 17

Relative spezifische Permeabilität für Kalkstein

$$K_r = \frac{K_{gesättigt}}{K_{ungesättigt}}$$

aus BUSCH/LUCKNER (1972)

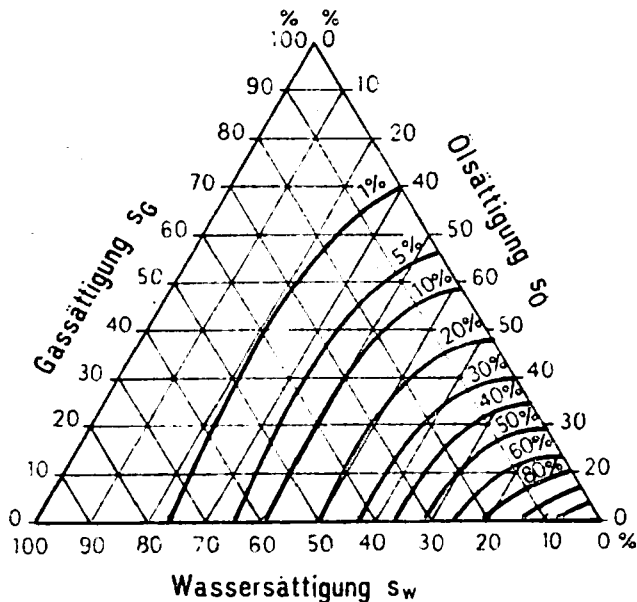


Bild 18

Relative Mineralöl-Durchlässigkeitsbeiwerte für Mittelsand nach BEYER/SCHWEIGER (1967)

Tritt eine weitere Phase hinzu, z. B. Wasser/Luft/Öl/Korngerüst (4-Phasen-System), verkomplizieren sich die Beziehungen weiter. Nach BEYER/SCHWEIGER (1967) hängt die relative Durchlässigkeit vom Anteil aller beweglichen Phasen ab (Bild 18).

3.2.3. Klüftströmung

Eine rechnerische Erfassung der Klüftströmung ist infolge der unregelmäßigen und in ihrer Gesamtheit kaum erfassbaren Verteilung der Klüfte außerordentlich schwierig. Es wurde für die Berechnung versucht, sowohl die Gesetze der Rohrhydraulik (Massenströmung) auf einzelne Klüfte anzuwenden als auch für einen ganzen Lagerstättenkomplex die Klüftströmung als Filterströmung aufzufassen. Für den letzten Fall wurden auch Bestimmungsgleichungen für modifizierte k -Werte aufgestellt (vgl. BUSCH/LUCKNER (1972)), deren Anwendung allerdings umstritten ist (häufig postlinearer oder turbulenter Bereich nach Bild 9). Ein weiteres Berechnungsmodell wurde für kombinierte Poren- und Klüftströmung von BARENBLATT/SCHELTOW (1960) vorgeschlagen.

Im Prinzip dürften auch derzeit noch standortbezogene demonstrative Nachweise für klüftige Gesteine am besten sein.

3.2.4. Strömung in bindigen Gesteinen

Mit geringer werdenden Korndurchmessern bzw. Porenkanalquerschnitten nähert man sich einer unteren Grenze für die Anwendbarkeit des DARCY-Gesetzes. Allerdings ist dieser Bereich bisher noch ungenügend untersucht und auch theoretisch noch nicht ausreichend geklärt.

Allgemein wird die Abweichung vom linearen Strömungsgesetz dem wachsenden Einfluß elektromolekularer Kräfte (Haftkräfte) zugeschrieben. Nach NAGY/KARADI (1961) ist die untere Grenze für die Anwendbarkeit des DARCY-Gesetzes durch die Eigenschaften der um das Gesteinskorn gebildeten Hülle an gebundenem Wasser bestimmt. Nimmt diese den vollen Durchflußquerschnitt ein, setzt eine Sicherung erst nach Überschreiten eines von der Bodenfeuchtigkeit abhängigen Anfangsgradienten J_k ein (Bild 19). Von diesem Wert an ist der Zusammenhang von Sickergeschwindigkeit und hydrau-

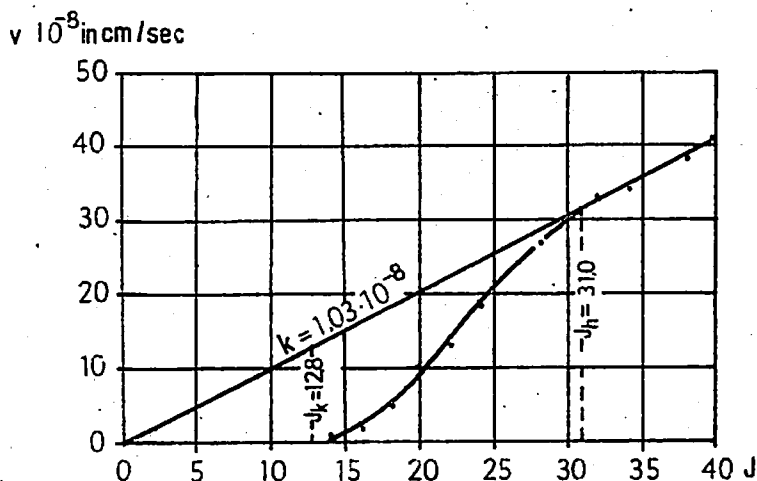


Bild 19

Beziehung zwischen Sicker-
geschwindigkeit und
hydraulischem Gradienten für Tonböden
nach NAGY/KARADI (1961)

lichem Gradienten durch eine Kurve gekennzeichnet, die bei einem gewissen Gradienten J_h in die lineare DARCY-Beziehung übergeht.

In Verbindung mit der Darstellung einer Labormethode zur Bestimmung des Permeabilitätskoeffizienten an Gesteinsproben niedriger Durchlässigkeit stellen FÖRSTER/HAUENHERM (1971) fest, daß für $K < 1$ md dieser Wert nicht mehr als Gesteinskonstante anzusehen ist. Vielmehr kommt es zu Gleiteffekten an der Porenraumwand, die in Verbindung mit Diffusionserscheinungen zu einer druckabhängigen Vergrößerung der Permeabilität führen (KLINKENBERG-Effekt).

Es wird folgende erweiterte DARCY-Gleichung angegeben (für Gase):

$$v = K \cdot \frac{p_m \cdot \Delta p}{\mu \cdot l \cdot p_A} + c \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{\Delta p}{l \cdot p_A} \quad (36)$$

- p_m - mittlerer Druck
- Δp - Differenzdruck
- p_A - Ausgangsdruck
- μ - Viskosität
- l - Probenlänge
- T - absolute Temperatur
- M - Molgewicht
- c - Gleitkonstante

Der Einfluß von K wird mit abnehmendem Porenraum immer geringer, während der von c zunimmt.

Es existieren noch weitere Methoden zur k-Wert-Ermittlung (vgl. Anlage 3. Abschn. 1.1.4., 1.2.4.1.), ohne daß dadurch die Problematik generell gelöst ist.

3.2.5. Einfluß der Kompressibilität

Besonders bei tiefliegenden Gesteinen muß deren elastisches Verhalten, ausgedrückt in Spannungen im Gesteinsgerüst σ infolge des überlagernden Gebirges und die vom Porenhalt ausgeübte Druckspannung p im Porenraum sowie deren Einfluß auf die Durchlässigkeit, berücksichtigt werden. In VOIGT u. a. (1973) werden diese gegenläufig wirkenden Beanspruchungen zu einer effektiven oder Vergleichsspannung σ_{eff} zusammengefaßt:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma - n \cdot p \quad (37)$$

($n \leq 1$ - Entlastungskoeffizient)

Eine empirische Abhängigkeit der effektiven Spannung vom Permeabilitätskoeffizienten zeigt Bild 20.

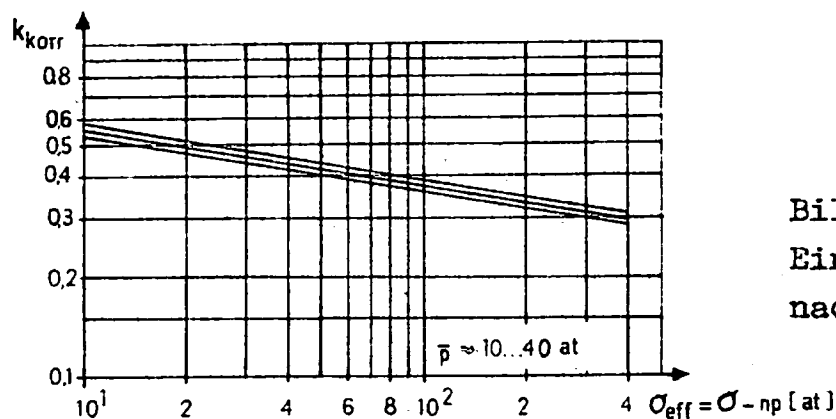


Bild 20
Einfluß von σ_{eff} auf K
nach VOIGT u. a. (1973)

3.2.6. Vertikal- und Horizontalströmung

Wie allgemein bekannt, ist der k-Wert in horizontaler Strömungsrichtung k_h bei den meisten Grundwasserleitern um ein Vielfaches größer als der vertikale Wert k_v an gleicher Stelle.

Dieser bis zum 30fachen und mehr betragende Unterschied kann verschiedene Ursachen haben:

- a) Die einzelnen Körner der Lockergesteinsgrundwasserleiter weichen i. allg. von der Kugelform ab (Mikrostruktur) und

sind so abgelagert, daß ihre größten Abmessungen horizontal gerichtet sind, wodurch die vertikale Durchlässigkeit geringer wird.

- b) Grundlegende Bedeutung hinsichtlich der Filtrationsanisotropie hat die genetisch bedingte Schichtung innerhalb der Grundwasserleiter und der damit verbundene in Vertikalrichtung häufig wechselnde Kornaufbau (Makrostruktur). Die unterschiedlichen k -Werte der einzelnen Schichten haben zur Folge, daß sich die Durchlässigkeiten in verschiedenen Richtungen ggf. grundlegend unterscheiden.

Für spezielle Aufgaben, z. B. die Wahl bzw. Bewertung von Grundwasserfassungen, ist die Kenntnis der k_h -Wert-Verteilung im vertikalen Profil ggf. von Bedeutung. LOHR (1969) schlägt in diesem Zusammenhang die Darstellung von k_h -Wert-Kurven vor, wobei er für Grundwasserleiter mittlerer Mächtigkeit (ca. 20 m) drei vereinfachte Grundformen untersucht (Bild 21).

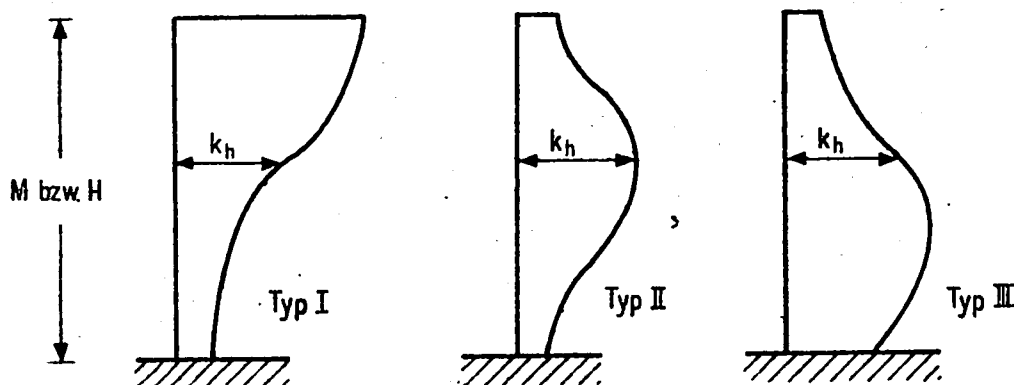


Bild 21

Grundformen für k_h -Wert-Kurven nach LOHR (1969)

Die Kenntnis von k_v ist besonders bei Versickerungsvergängen sowie bei Betrachtung kugelförmiger Strömungsfelder von Interesse.

Den Mittelwert $k_m(R)$ in einer bestimmten Richtung für geschichtete Grundwasserleiter errechnet man bei Annahme jeweils in sich homogener Schichten nach den Beziehungen

$$k_{mh} = \frac{k_1 \cdot h_1 + k_2 \cdot h_2 + \dots + k_n \cdot h_n}{H} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (38)$$

$$k_{mv} = \frac{H}{h_1/k_1 + h_2/k_2 + \dots + h_n/k_n} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n h_i/k_i} \quad (39)$$

$H = \sum h_i$ - Gesamtmächtigkeit

h_i - Mächtigkeit der i -ten Schicht

k_i - k -Wert der i -ten Schicht

Eine derartige Mittelbildung ist allerdings nach CHARDABELLAS (1964) bei größerer Mächtigkeit übereinanderliegender Teilhorizonte (Schichten) nicht mehr anwendbar.

Vor einer unbedachten Verwendung gewogener Mittelwerte k_{mh} warnt SCHNEIDER (1973), da hierbei eine hydraulische Bewertung der einzelnen Schichten nach ihrer Höhenlage nicht durchführbar ist. Wie aus seinen Versuchen (Bild 22) ersichtlich, erbringen Brunnen bei gleichen Schichtmächtigkeiten und k_h -Werten in Abhängigkeit von deren räumlicher Anordnung unterschiedliche Leistungen.

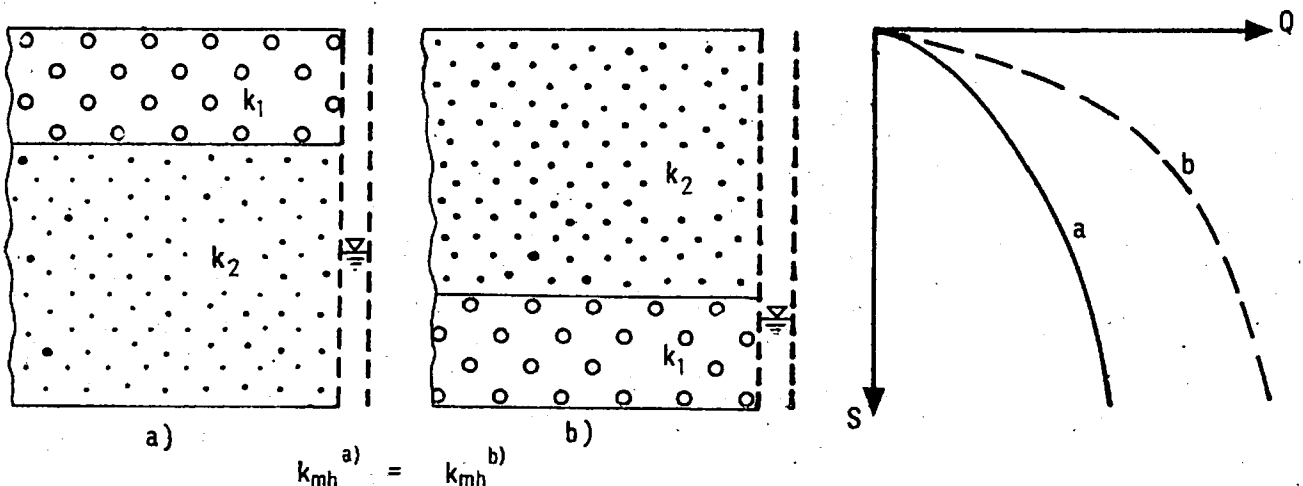


Bild 22

Leistungscharakteristik für Schichtung mit verschiedener Reihenfolge nach SCHNEIDER (1973)

Für geohydraulische Berechnungen erfolgt die Berücksichtigung der Strömungsanisotropie i. allg. durch Überführung des Strömungsfeldes in ein fiktives isotropes Feld durch geometrische Verzerrung.

Der mittlere k-Wert für dieses fiktive isotrope Feld beträgt dann

$$k_m = \sqrt{k_h \cdot k_v} \quad (40)$$

(vgl. BUSCH/LUCKNER (1972)).

- c) Insbesondere im Bodenbereich erlangen die biologisch bedingten Megaporen (z. B. Wurm- und Wurzelröhren) ggf. gravierende Bedeutung. Besonders in sehr feinkörnigen Materialien ist der Einfluß nicht zu vernachlässigen. So ergab sich nach HUTH (1968), daß bindige Erdstoffe durch Regenwurmkonäle hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit so stark verändert werden können, daß sie mittelkörnigen nichtbindigen Gesteinen entsprechen. KOPP (1965) ermittelte, daß 3 - 5 % solcher Megaporen in Löß eine gleiche Versickerung zulassen wie 10 - 15 % texturbedingte Makroporen im Sand. Derartige Megaporen führen natürlich meist zu einer Vergrößerung von k_v im Vergleich zu k_h .

3.3. Zusammenfassende Bewertung

Aus den vorangegangenen Betrachtungen zeigt sich, daß bei der Vielfalt der Einflußgrößen auf die Durchlässigkeit einerseits eine Bewertung im konkreten Fall unter Beachtung zahlreicher Faktoren des Milieuzustandes und Strömungsprozesses erfolgen muß, andererseits eine gleichzeitige und umfassende Berücksichtigung aller dieser Einflüsse kaum möglich ist. Abgesehen davon, daß die Beschreibung der Grundwasserströmung mittels DARCY-Gesetz ohnehin die wirkliche durch eine fiktive Strömung ersetzt, gehen die zur k-Wert-Bestimmung verfügbaren Verfahren und Formeln generell von stark vereinfachten Voraussetzungen aus, so daß es sich bei den Ergebnissen, wie bereits eingangs gesagt, immer nur um Näherungslösungen handeln kann.

In diesem Zusammenhang muß man wohl der Feststellung verschiedener Autoren wie CHARDABELLIAS (1964), UBELL, DÜRBAUM (1967) u. a.

folgen, daß vielfach Schwankungen der k-Werte weniger auf Veränderungen der Gesteinsbeschaffenheit oder des Strömungszustandes zurückzuführen sind als auf Abweichungen der hydrogeologischen Gegebenheiten von den theoretischen Voraussetzungen, unter denen die benutzte Formel abgeleitet wurde.

Unter Beachtung dieser Einschränkungen kann man postulieren:

In den für die Wasserversorgung allgemein genutzten quartären und tertiären nichtbindigen, porösen, wassergesättigten Grundwasserleitern (mit Ausnahme grober Schotter) ist für ein und dasselbe Gestein bei gleichbleibender Gesteinsstruktur und in den üblichen natürlichen Gefälle- und Temperaturbereichen der k-Wert eine petrophysikalische Konstante zur Charakterisierung eines Strömungsvorganges.

Entsprechend dieser Voraussetzungen ist zur groben Einschätzung und Beschreibung regionaler Durchlässigkeitsverhältnisse eine Klassifizierung und kartenmäßige Darstellung nach typischen mittleren k-Werten möglich und gerechtfertigt.

Für Festgestein mit vorwiegender Kluftströmung allerdings sollte auf eine analoge Interpretation verzichtet werden.

4. Klassifikation der Durchlässigkeit

In der Fachliteratur werden eine Reihe von Klassifikationen der Durchlässigkeiten und der Durchlässigkeitskoeffizienten angegeben. Diese sind für unterschiedliche Zielstellungen konzipiert, wie z. B. für eine generelle Einschätzung der Grundwasserhöflichkeit, für Kartierungsaufgaben, zur Einschätzung der Einsatzmöglichkeiten von Entwässerungsverfahren, aber auch für grobe Überschlagsrechnungen.

Je nach Verwendungszweck existieren Klassifizierungsgesichtspunkte, die sich letztlich auch in der Aussagegenauigkeit unterscheiden. Eine sehr grobe halbquantitative Bewertung der Durchlässigkeit wurde von GARLING/BAMBERG (1974) vorgeschlagen (Tabelle 4).

Tabelle 4

k-Wert in (m/s)	Durchlässigkeit
$> 1 \cdot 10^{-3}$	sehr gut
0,5 ... $1 \cdot 10^{-3}$	gut
0,05 ... $0,5 \cdot 10^{-3}$	mittel
0,0005 ... $0,05 \cdot 10^{-3}$	schlecht
$< 0,0005 \cdot 10^{-3}$	GW-Stauer

Eine ähnliche, aber wesentlich genauere Einstufung bei gleichzeitiger Zuordnung konkreter Gesteinsarten erlaubt die Klassifikation nach PLOTNIKOW (Anlage 2.1.).

Häufig verwendet werden Klassifikationen nach petrophysikalischen Gesichtspunkten, wie sie in den Bildern 23 bis 26 dargestellt sind. Hierin ist deutlich erkennbar, wie selbst für eng begrenzte Gesteinsfraktionen (z. B. Feinsand) die k-Werte in sehr breiten Bereichen bis zu mehreren Zehnerpotenzen schwanken können. Man muß deshalb auch Gliederungsvorschläge, wie sie in Tabelle 5, insbesondere aber in Anlage 2.4. empfohlen wurden, mit entsprechender Skepsis betrachten.

Tabelle 5

Hauptkornfraktion	k in (m/s)	
	nach GARLING/BAMBERG (1973)	nach SCHIRRMESTER (1975)
Schluff	$< 0,1 \cdot 10^{-4}$	-
Feinsand, schluffig	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,35 \cdot 10^{-4}$
Feinsand	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Feinsand, mittelsandig	-	$(1,7 \dots 1,9) \cdot 10^{-4}$
Mittelsand, feinsandig	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$(2,8 \dots 3,6) \cdot 10^{-4}$
Mittelsand	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
Mittelsand, grobsandig	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$
Grobsand	$10,0 \cdot 10^{-4}$	-
Grobsand, kiesig	$25,0 \cdot 10^{-4}$	-
Kies	$50,0 \cdot 10^{-4}$	-

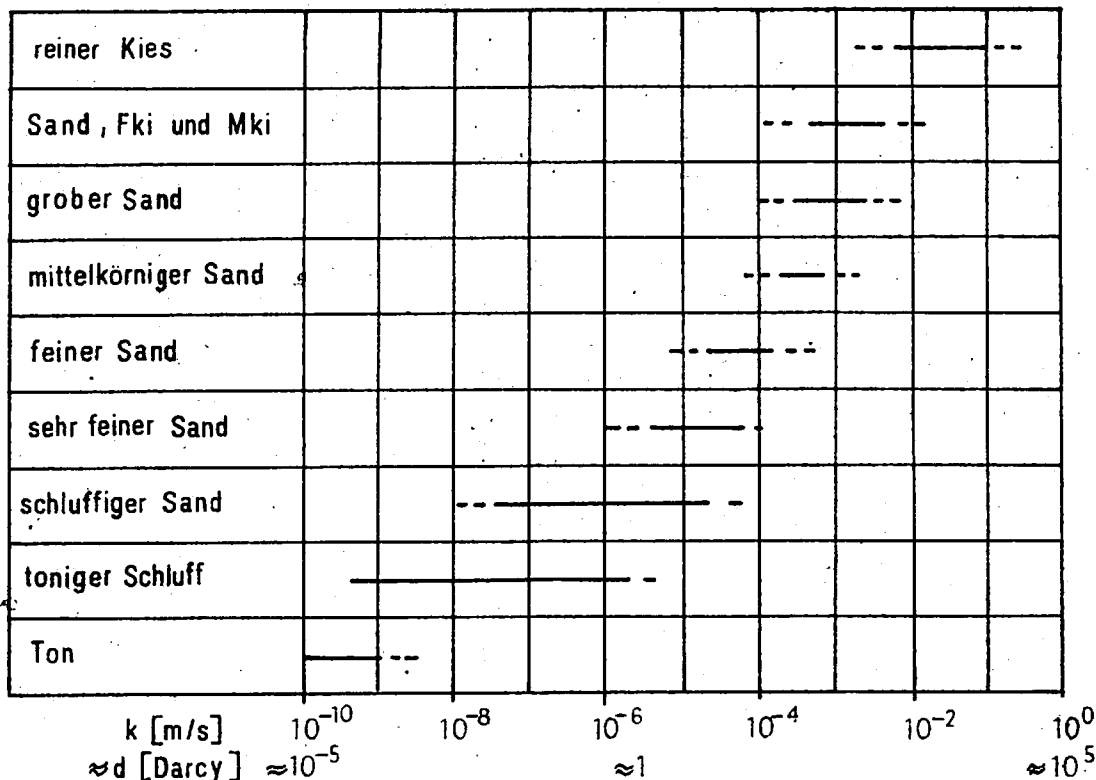


Bild 23
 Klassifizierung der Durchlässigkeit nach DÜRBAUM (1969)
 (in RICHTER/LILLICH, 1975)

Gesteintypen	Permeabilitätsklassen (cm/s)						Brunnenergiebigkeit			Wasserleitertypen
	10 ²	10 ⁰	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	hoch	mittel	gering	
SEDIMENTE, unverfestigt										
Kies (Schotter, Geroll)	-----						-----			GW-Leiter
Grobsand	-----						-----			GW-Leiter
Mittel- bis Feinsand	-----						-----			GW-Leiter
Schluff	-----						-----			halbdurchlässiges
Ton	-----						-----			Gestein
SEDIMENTE, verfestigt										
Kalkstein, dolomitisch	-----						-----			GW-Leiter o. Stauer
Sandstein, grob und mittel	-----						-----			GW-Leiter o. halbdurchl.
Sandstein, fein, Schieferton	-----						-----			GW-Leiter o. Stauer
Schiefer, Schluffstein	-----						-----			GW-Stauer o. Leiter
VULKANISCHES GESTEIN										
Basalt	-----						-----			GW-Leiter o. Stauer
Saure Vulkanite	-----						-----			GW-Stauer o. Leiter
KRISTALLINE GESTEINE										
Plutonite und Metamorphite	-----						-----			GW-Stauer o. Leiter

Bild 24
 UNESCO-Zusammenstellung der Durchlässigkeiten nach
 BROWN (1972) (in HEITFELD u. a., 1974)

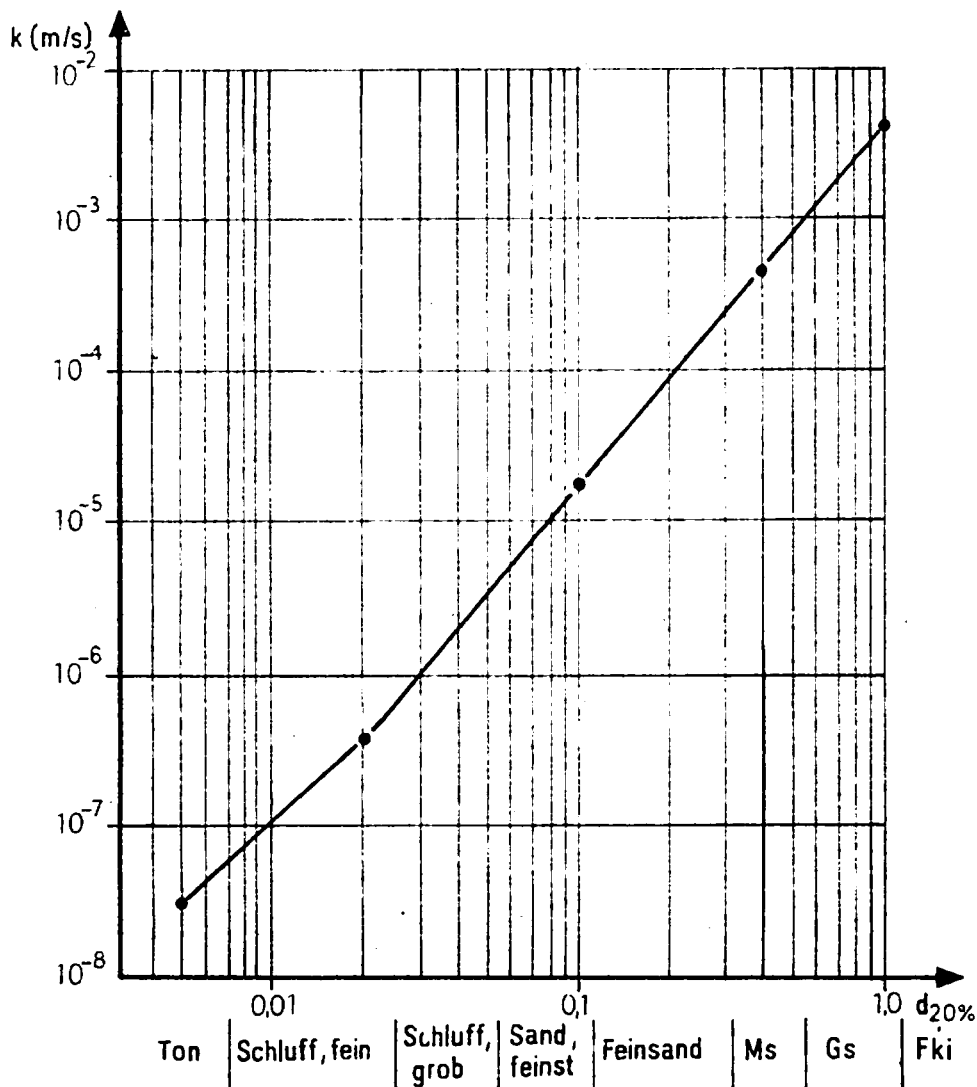


Bild 25

Klassifikation des k -Wertes in Abhängigkeit von $d_{20\%}$ aus Siebanalysen nach Werten des US-Bureau of Soil Classification (aus CHARDABELLAS, 1964)

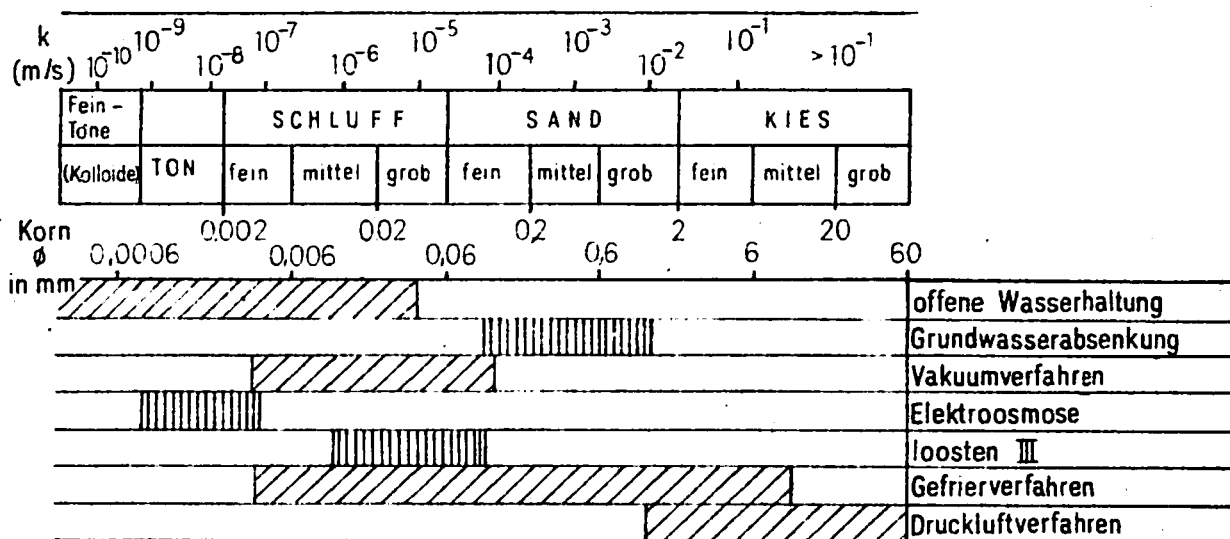


Bild 26

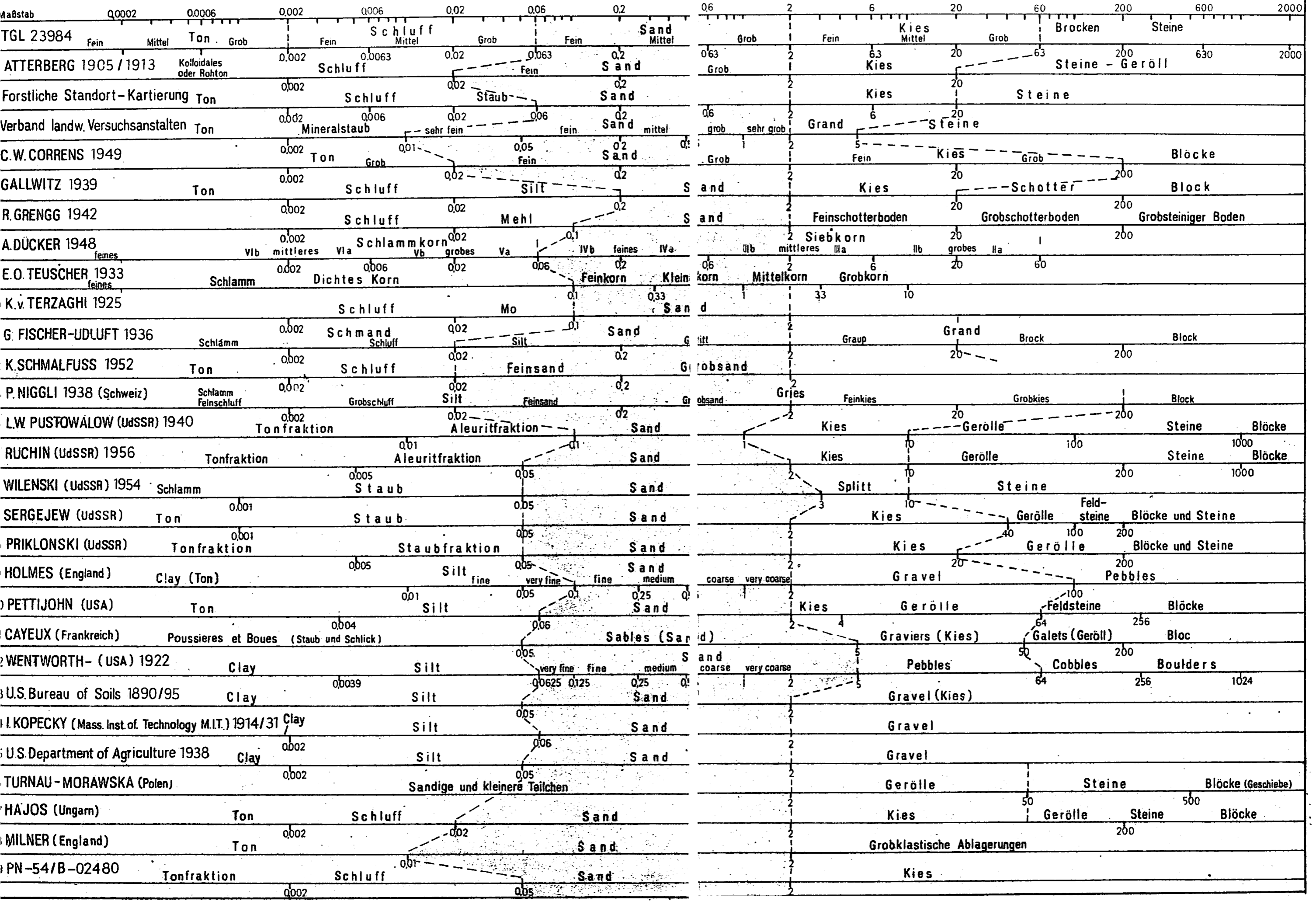
Zuordnung der k -Werte nach NEUFFER (1960)

Erschwerend wirkt sich in diesem Zusammenhang noch aus, daß häufig mit gleichen Gesteinsbezeichnungen unterschiedliche Körnungsbereiche gemeint sind (Bild 27, Anlage 2.3.).

Eine derartige Zuordnung konkreter Einzelwerte zu lithologischen Angaben bedarf in jedem Falle einer zusätzlichen Quantifizierung durch regionale, genetische und stratigraphische Angaben. Ein diesbezüglicher Versuch wurde für das Gebiet der DDR beispielsweise im Grundwasserlagerstättentypenkatalog von GARLING/BAMBERG (1974) unternommen (Anlage 2.2.). Auch von anderen Autoren wurden derartige Präzisierungen der Gesteinsansprache vorgenommen (Anlage 2.3.).

Eine genauere Berechnung oder Kartierung unter Verwendung von k-Werten, die aus Gesteinsklassen (z. B. aus Schichtenverzeichnissen) abgeleitet wurden, ist nur sinnvoll und möglich, wenn eine gewisse Eichung anhand vorliegender benachbarter genauer Untersuchungsergebnisse vorgenommen wird.

Bild 27
Zusammenstellung verschiedener Klassifikationen klastischer Gesteine (nach KAD() u.a.1964)



5. Zur Parametergenauigkeit in der Grundwassererkundung

Unter Genauigkeit sei der Grad der Übereinstimmung von Untersuchungs-(Erkundungs-)ergebnissen mit den tatsächlichen Verhältnissen verstanden. Dementsprechend werden die Abweichungen der erkundeten von den wahren Werten als Fehler bezeichnet. Fehler sind also der quantitative Ausdruck für die Genauigkeit.

Allgemein werden folgende drei Fehlerarten unterschieden:

- Systematische Fehler entstehen durch in ganz bestimmter Weise wirkende Ursachen, die im einzelnen erkennbar, erfaßbar, bestimmbar und ausschaltbar sind. Solche Fehler entstehen z. B. durch unvollkommene Untersuchungs- und Meßverfahren, schlecht geeichte bzw. konstruierte Meßgeräte, äußere Versuchsbedingungen. Ein Erkennen und Beseitigen dieser Fehler kann u. a. durch
 - . Anwendung anderer bzw. besserer Meßverfahren
 - . Messung mit anderen Geräten und/oder
 - . durch andere Beobachter ("äußere Kontrolle")
 - . Messung unter veränderten Umweltbedingungen erfolgen.
 Da sich systematische Fehler gesetzmäßig ändern bzw. unverändert bleiben, können sie durch Korrekturen ausgeschaltet werden.
- Zufällige Fehler entstehen durch in verschiedener Weise wirkende Ursachen, die im einzelnen nicht erfaßbar sind. Sie sind praktisch unvermeidlich und nicht durch Korrekturen zu beseitigen. Ein Erkennen und Berücksichtigen ist nur durch (mehrfache) Wiederholung derselben Messung (Beobachtung) als Streuung um einen Mittelwert möglich ("innere Kontrollen", Meßreihen).
- Grobe Fehler sind als "Ausreißer" i. allg. leicht erkennbar und durch Kontrollmessungen zu beseitigen. Sie entstehen z. B. durch Unaufmerksamkeit, Rechenfehler, defekte Apparate usw.

Bei der Betrachtung der Genauigkeit hydrogeologischer Parameter ist es nach BAMBERG/GARLING (1977) erforderlich, zwei grund-

legende Gesichtspunkte zu beachten, nämlich die Genauigkeit einer Einzelbeobachtung und die Repräsentanz dieser Beobachtung für einen bestimmten Bereich.

5.1. Genauigkeit der Einzelparameter

Grundlage jeder Fehlerbetrachtung ist die Genauigkeit der Übereinstimmung eines Untersuchungsergebnisses der an einem eng begrenzten Ort (z. B. Probenahmestelle, Bohrloch, Versuchsbrunnen) vorgenommenen konkreten Ermittlung mit dem tatsächlichen Wert an dieser Stelle.

Im speziellen Falle könnte man von der Genauigkeit der "Punktdurchlässigkeit" sprechen.

Der Grad dieser Genauigkeit wird auch als Vertrauenswürdigkeit der Untersuchung bezeichnet und findet seinen quantitativen Ausdruck im "technischen Fehler" Δ :

$$\Delta = x_i - X_i \quad (41)$$

x_i - ermittelter Wert einer realen Messung an der Stelle i

X_i - tatsächlicher Wert an der gleichen Stelle

Man bezeichnet eine Beobachtung mit

$\Delta = 0$ als vollständig vertrauenswürdig

$\Delta \neq 0$ als gering oder nicht vertrauenswürdig.

Der "technische Fehler" kann systematischer oder zufälliger Natur sein und hat bezüglich des k -wertes seine Ursachen in Meßfehlern und methodischen Fehlern.

a) Meßfehler

Meßfehler treten vorwiegend bei hydrogeologischen Feldarbeiten auf und beziehen sich im Prinzip auf eine fehlerbehaftete Ermittlung der physikalischen Grundgrößen Länge, Masse, Zeit, Temperatur, Stromstärke und Stoffmenge. Je nach verwendeten Bestimmungsverfahren treten diese Meßgrößen in unterschiedlicher Form auf, wobei insbesondere die Vielfalt der Längenmessungen dominiert (z. B. Bohrloch- und Körnungsdurchmesser,

Teufen, Wasserstände, Geometrie der Versuchsanlage). Obwohl auch systematische Meßfehler auftreten können, werden Messungen i. allg. primär als mit zufälligen Fehlern behaftet angesehen. Ausführliche Untersuchungen hierzu erfolgen in BAMBERG u. a. (1977).

b) Methodische Fehler

Bei der Bestimmung von Durchlässigkeitsparametern sind die methodischen Fehler vorwiegend systematischer Natur. Sie beziehen sich insbesondere auf eine

- unzureichende Einschätzung der natürlichen Verhältnisse (z. B. Anisotropie, Inhomogenität usw.)
- unzureichende Erfassung der Strömungsverhältnisse durch angewandte Berechnungsverfahren (z. B. Gültigkeit DARCY-Gesetz)
- unzulässige Vereinfachung bei der Beschreibung des Strömungsprozesses (z. B. Anwendung verschiedener Bestimmungsverfahren; Untersuchungsdauer (PV) viel geringer als spätere Nutzungsdauer).

Infolge der vielfachen und ggf. auch gegenläufigen Einflüsse auf die zu ermittelnde Punktdurchlässigkeit ($k = k(x, y \dots n)$) ist eine komplexe Fehleranalyse recht kompliziert und aufwendig, und es liegen nur wenige Untersuchungen hierzu vor. Der Vielzahl der zur k-Wert-Berechnung verfügbaren Verfahren steht eine völlig unzureichende Bewertung und Fehlereinschätzung derselben gegenüber.

Einen ersten wertvollen Versuch der Einschätzung des Einflusses der als unabhängige Variable anzusehenden Einzelfehler ($dx, dy \dots dn$) auf den ermittelten k-Wert wird von ILJIN u. a. (1971) auf der Grundlage des GAUSSschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes (42)

$$\sigma_k = \frac{1}{k} \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial y} \sigma_y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial k}{\partial n} \sigma_n\right)^2} \quad (42a)$$

$$\delta(k) = \frac{1}{k} \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial y} dy\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial k}{\partial n} dn\right)^2} \quad (42b)$$

bzw. besser mit der Beziehung (43) vorgenommen.

$$dk = \frac{\partial k}{\partial x} dx + \frac{\partial k}{\partial y} dy + \dots + \frac{\partial k}{\partial n} dn \quad (43a)$$

$$\delta(k) = \frac{dk}{k} = \frac{1}{k} \left(\frac{\partial k}{\partial x} dx + \frac{\partial k}{\partial y} dy + \dots + \frac{\partial k}{\partial n} dn \right) \quad (43b)$$

σ	- Streuung
dk	- absoluter Fehler von k
dx, dy, dn	- Fehler der Einzelparameter (Meßfehler)
$\delta(k)$	- relativer Fehler von k

Geht man davon aus, daß die vorwiegend systematischen methodischen Fehler durch planmäßige methodische Forschung (z. B. Vereinheitlichung durch Standardisierungsarbeiten) sowie Kontrollmaßnahmen (Anwendung verschiedener Bestimmungsverfahren) weitgehend eingeschränkt bzw. ausgeschaltet werden, sind für Fehlerbetrachtungen der Punktdurchlässigkeit insbesondere die Meßfehler von Interesse.

Spezielle Ergebnisse derartiger Untersuchungen werden bei der Beschreibung der einzelnen Verfahren angeführt.

5.2. Repräsentanz des Einzelwertes

Für Grundwasservorratsberechnungen sind i. allg. weniger Punktdurchlässigkeiten von Interesse, sondern mehr eine Gebietsdurchlässigkeit bzw. eine Durchlässigkeitsverteilung. In diesem Zusammenhang erhebt sich die Frage nach der Repräsentanz, d. h. nach der Genauigkeit, mit der ein (vertrauenswürdiger) Einzelwert einen gewissen Geltungsbereich (z. B. Grundwasserleiter oder Teil davon) widerspiegelt, in dessen Grenzen er gewonnen wurde. Ein solcher Repräsentativwert soll für den ihm zugeordneten Lagerstättenbereich die gleichen Verhaltensweisen bewirken wie die innerhalb dieses Bereiches von Ort zu Ort wechselnden tatsächlichen Parameter. Hierbei wiederum kann man die rein geologisch-petrophysikalische Verhaltensweise der Gesteinsdurchlässigkeit betrachten oder man bezieht sich, wie es für hydrogeologische Prozesse allgemein als besser erkannt wurde, auf eine für den Strömungsvorgang repräsentative Parameterverteilung. Entsprechend der letztgenannten Zuordnung definiert REICHEL (1979)

die Repräsentativwerte als fiktives, hydrogeologisch homogenes Parameterfeld, das in seiner hydraulischen Wirkung dem natürlichen, hydrogeologisch heterogenen Grundwasserleiter äquivalent sein soll.

Der Fehler der Repräsentanz Δ_r kann durch die Beziehung

$$\Delta_r = x_i - X_M \quad (44)$$

ausgedrückt werden, mit

- x_i - ermittelter Wert einer realen Bestimmung an der Stelle i
 X_M - tatsächlicher Wert für den zu repräsentierenden Bereich

Da X_M allerdings praktisch weder bekannt noch je bestimmbar ist (jede Erkundung kann sich nur auf Stichprobenuntersuchungen beschränken), fehlt der Bezugspunkt für derartige Genauigkeitsuntersuchungen.

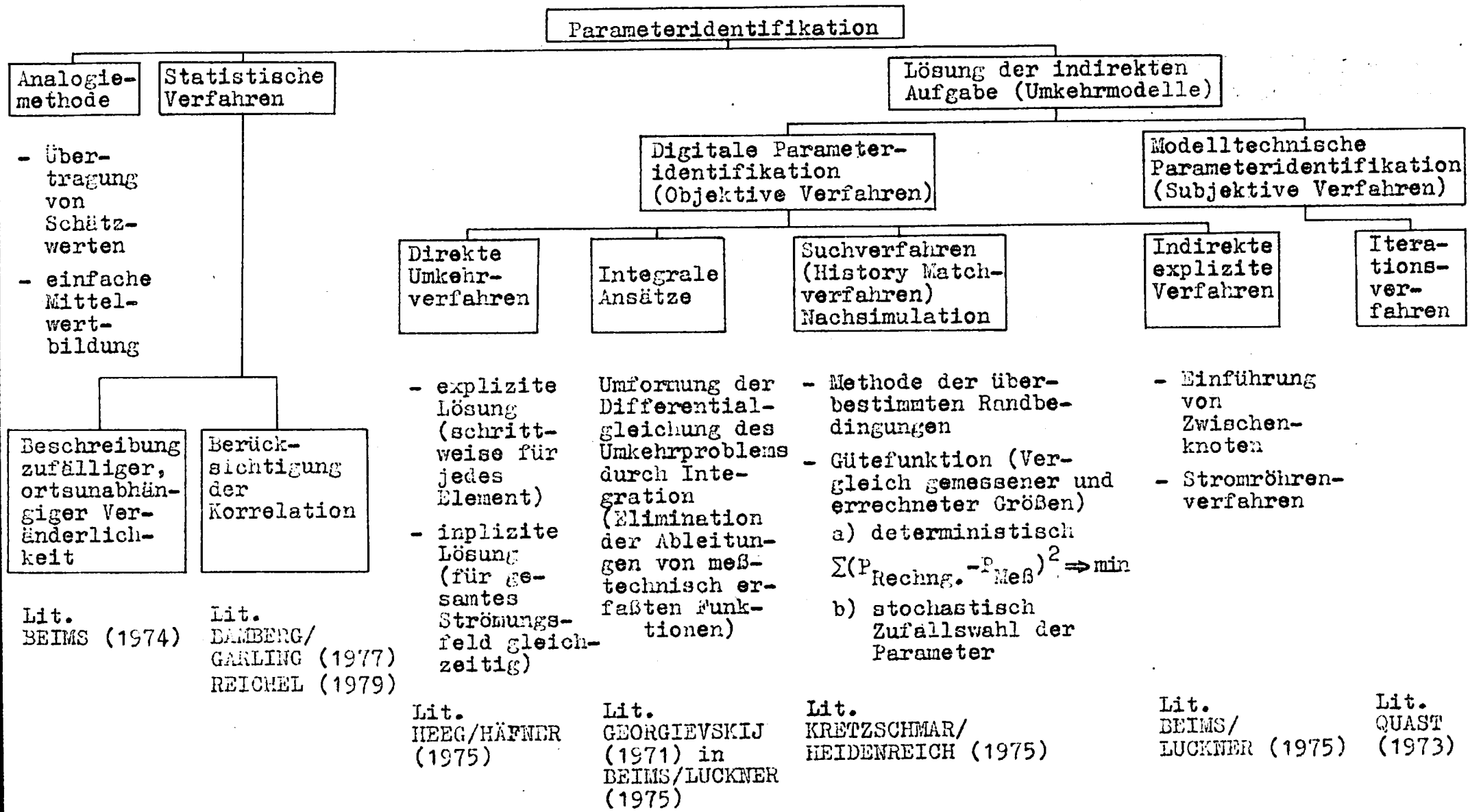
Ein Identifizieren bzw. Quantifizieren der Parameter (k-Werte), d. h. ein Feststellen der Übereinstimmung mit der Wirklichkeit, ist deshalb recht kompliziert, und man ist praktisch darauf angewiesen, statt der angegebenen faktischen Repräsentanz eine mehr oder weniger geschätzte mögliche Repräsentanz zu bestimmen. Für eine solche Parameteridentifikation stehen im Prinzip 3 Möglichkeiten zur Verfügung (vgl. Tabelle 6).

a) Analogiemethode

Diese bisher allgemein übliche Verfahrensweise besteht in der Festlegung eines für ein Feld maßgebenden k-Wertes durch Schätzung, Übertragung oder einfache Mittelwertbildung auf der Grundlage geologischer und physikalischer Bewertungen, Vergleiche und Analogien.

Obwohl man sich darüber im klaren sein muß, daß auch künftig geologische Bewertungen und Vergleiche Grundlage jeder Parameterquantifizierung sein müssen, führt doch die Festlegung repräsentativer Einzelwerte häufig zu Informationsverlusten und zu Fehlern der Vorratsberechnung, die allerdings schwierig zu quantifizieren sind.

Tabelle 6: Parameteridentifikation



b) Direkte Parameterquantifizierung

Diese erfolgt unter Verwendung wahrscheinlichkeitstheoretischer Veränderlichkeitsmodelle, wie sie z. B. von BEIMS (1974), BAMBERG/GARLING (1977) und REICHEL (1979) ausführlich untersucht wurden. Dabei werden die einzelnen Beobachtungen x_1 als Stichproben und Zufallsgrößen im wahrscheinlichkeitstheoretischen Sinne betrachtet. Entsprechend können dann die zu untersuchenden Fehler durch die Streuung σ angegeben werden.

Als gravierende Einschränkung für die Anwendung von statistischen Methoden in der Hydrogeologie muß allerdings auf die in der Praxis vielfach nicht vorhandene Mindestmenge an Stichproben (d. h. Einzelparametern) hingewiesen werden.

c) Indirekte Parameterquantifizierung

Etwa seit Beginn der 70er Jahre nehmen Untersuchungen zu dieser Problematik international einen bedeutenden Platz im Rahmen der Informationsgewinnung ein. Obwohl, wie Tabelle 6 zeigt, diesbezüglich eine Reihe von Methoden existiert und auch theoretisch erprobt wurde, stehen doch bisher noch keine für Routineuntersuchungen umfassend praxiswirksamen Verfahren zur Verfügung. Relativ günstige Ergebnisse wurden in erster Linie mit dem Iterationsverfahren nach QUAST erzielt.

Die indirekte Parameterquantifizierung baut auf den modernen Verfahren der mathematischen Modellierung des Strömungsprozesses auf und besteht im Prinzip darin, aus meßtechnisch relativ einfach erfaßbaren dynamischen Verhaltensreaktionen des Originalströmungsvorganges (Potential- und Mengenmeßwerte) in Verbindung mit einigen Strukturparametern Rückschlüsse auf die hydrogeologischen Parameter zu ziehen. Der besondere Vorteil dieser Verfahren liegt in der Bestimmung einer Parameterverteilung für das gesamte Strömungsfeld und Berücksichtigung aller Randbedingungen, wodurch eine erhebliche Verbesserung der Aussagen erzielt werden kann. Demgegenüber sind eine Reihe von Problemen und Nachteilen zu beachten:

- Gefahr der Mehrdeutigkeit der identifizierten Parameter, keine eindeutig bestimmbaren Repräsentativwerte (unterschiedliche Parameter können zu gleichem Ergebnis führen);
- geologische Störungen und Inhomogenitäten werden nicht direkt erkannt, sondern drücken sich im k -Wert aus;

- die ermittelten k-Werte repräsentieren den Strömungsvorgang und nicht den Strömungsraum, d. h., sie gelten primär für das spezielle Strömungsmodell ("Modellparameter"), und eine direkte hydrogeologische Deutung bzw. Übertragung auf die Natur ist nicht in jedem Falle gerechtfertigt;
- kleine Potentialänderungen haben großen Einfluß auf Parameterverteilung;
- quantitative Fehlerangaben sind derzeit schwer möglich, und die Genauigkeitseinschätzung erfolgt durch Vergleich mit bekannter Parameterverteilung;
- zur Modellierung sind eine Vielzahl von Bedingungen zu erfüllen, die ggf. einen erheblichen Aufwand voraussetzen (siehe Tabelle 7).

Inwieweit die ermittelte Punktdurchlässigkeit einen hydrogeologischen Bereich repräsentiert, ist von der Veränderlichkeit der natürlichen Verhältnisse dieses Bereiches abhängig. Unter Veränderlichkeit wird hierbei die Tatsache verstanden, daß hydrogeologische Merkmale an verschiedenen Stellen eines untersuchten Gebietes und/oder zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Größen aufweisen, also räumlich und zeitlich unbeständig sind.

Eine quantitative Beschreibung der Veränderlichkeit kann nach STOYAN (1974) durch folgende statistische Parameter vorgenommen werden:

Variationskoeffizient
(Schätzwert)

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (45)$$

Veränderlichkeitskoeffizient
(Schätzwert)

$$a = - \frac{\sum \tau \cdot \ln K(\tau)}{\sum \tau^2} \quad (46)$$

mit s - Standardabweichung

\bar{x} - arithmetisches Mittel

τ - Abstand (Verschiebung) benachbarter Punkte

K (τ) - Autokorrelationsfunktion

Tabelle 7: Voraussetzungen für die Anwendung der indirekten Parameterquantifizierung

Voraussetzungen	Bedingungen	Bemerkungen
Lösungsfunktion der Standrohrwasserspiegelhöhe h für gesamtes Strömungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> - Örtliche Verteilung (Meßstellendichte) muß Interpolation eines geschlossenen Isohypsenplanes für gesamtes Strömungsfeld zulassen - Messungen müssen für einheitlichen Zeitpunkt vorliegen (Stichtagsmessungen) - es müssen örtlich variable Werte für h vorliegen; GW-Bewegung muß stattfinden (ungleiche Randpotentiale) - GW-Strömung stellt ungleichförmige Bewegung dar (veränderliche Gradienten) - große Genauigkeit der Messungen erforderlich (Fehlmessungen von 10-20 cm verfälschen Ergebnis) - es muß generelle Übereinstimmung der Strömungscharakteristik im Erkundungs- und späteren Betriebszustand vorliegen - Lösungsfunktion für mehrere Strömungszustände gewünscht (z. B. MW, HW) 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Vorgabe von Fehlerschranken - keine quantitativen Aussagen über Genauigkeit möglich - je geringer Gradientenänderung im Feld, um so größere Genauigkeit der Messung erforderlich - Meßnetzgestaltung besitzt vorrangige Bedeutung; diesbezügliche Untersuchungen liegen noch nicht vor
Lösungsfunktion der Durch- und Abflußmengen q ; Hydrologie der Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - Simultane Durchfluß- und Wasserstandsmessungen in Vorflutern, Wasserfassungen usw. - Genauigkeit für Mengenummessung $\pm 10\%$ ausreichend 	Besondere Schwierigkeiten treten hinsichtlich der Berücksichtigung der GW-Neubildung und der Randbedingungen 3. Art auf
Geometrie (Struktur)	<ul style="list-style-type: none"> - Kontinuierliche Darstellung der geologischen Struktur (Schnitte, Karten) benötigt - grobe Darstellung (geringe Genauigkeit) ausreichend, da primär das hydrodynamische Verhalten betrachtet wird 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Vorgabe von Fehlerschranken - keine quantitativen Aussagen über Genauigkeit möglich - bevorzugter Einsatz der Geophysik wäre anzustreben - je mehr Kenntnisse über Struktur vorliegen, um so besser können Ergebnisse interpretiert werden
Anschlußkennwerte	<ul style="list-style-type: none"> - Auswahl von Merkmalen, die für Fließgeschehen signifikant sind, z. B. T_0, k_0 - Repräsentative Mittelwerte und Kenntnis über verarbeitungsadäquates Modell erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> - Anschlußelemente erfordern erheblichen Kenntnisstand über Objekt - Fassungsstandort muß bekannt sein

STOYAN deutet die Veränderlichkeit der Merkmalswerte als "Schwingungen" mit der Amplitude v und der Frequenz a , d. h., je größer v ist, um so mehr weichen die Einzelwerte vom Mittel ab bzw. je größer a ist, um so häufiger schwanken die Einzelwerte um den Mittelwert. Mit anderen Worten nimmt die Veränderlichkeit mit wachsendem v und a zu.

Wie bereits erwähnt, werden im Rahmen dieser Arbeit zeitliche Veränderungen der Durchlässigkeit nicht betrachtet. Die räumliche Veränderlichkeit der Durchlässigkeit wird in der sowjetischen Literatur mit dem Begriff der Filtrationsinhomogenität treffend charakterisiert. Je nach dem Grad dieser Inhomogenität (Kompliziertheit der Lagerstätte) kann ein Einzelparameter (Punktdurchlässigkeit) einen mehr oder weniger großen Bereich repräsentieren. Während also beispielsweise ein k -Wert in homogenen Feinsanden für mehrere Meter repräsentativ sein kann, wäre ggf. für klüftiges Festgestein überhaupt keine Repräsentanz vorhanden.

In den Untersuchungen von BAMBERG/GARLING (1977) wurde die wesentliche Erkenntnis gewonnen, daß die Filtrationsinhomogenität (Veränderlichkeit) ein relativer Begriff ist und für einen bestimmten Gesteins- oder Grundwasserleiterkomplex keinen konstanten Wert darstellt. Vielmehr bestehen diesbezüglich funktionelle Beziehungen zur Größe (Länge, Fläche, Volumen) des betrachteten Komplexes bzw. zum Untersuchungsabstand. Dieser Sachverhalt wird z. B. für die Filtrationsinhomogenität in Urstromtälern durch die empirischen Kurven in Bild 28 deutlich.

Für die Untersuchung der Repräsentanz einer Stichprobe ist diese Erkenntnis einer gebietsgrößenabhängigen Filtrationsinhomogenität von grundlegender Bedeutung, kann danach doch ein und derselbe Grundwasserleiter je nach Betrachtungszone homogen oder inhomogen sein. So kann beispielsweise ein relativ einheitlicher Grundwasserleiter im ganzen als homogen angesehen werden, auch wenn die darin enthaltenen Bohrungen in sich betrachtet infolge feinsten Schichtungen ("Laminenstruktur") völlig inhomogen sind. Unter diesem Aspekt sind auch die Aussagen verschiedener Autoren, wie MILDE/HEILMANN (1965) und BEIMS/LUCKNER (1974), zu sehen, die feststellen, daß der k -Wert aus Einzelproben in

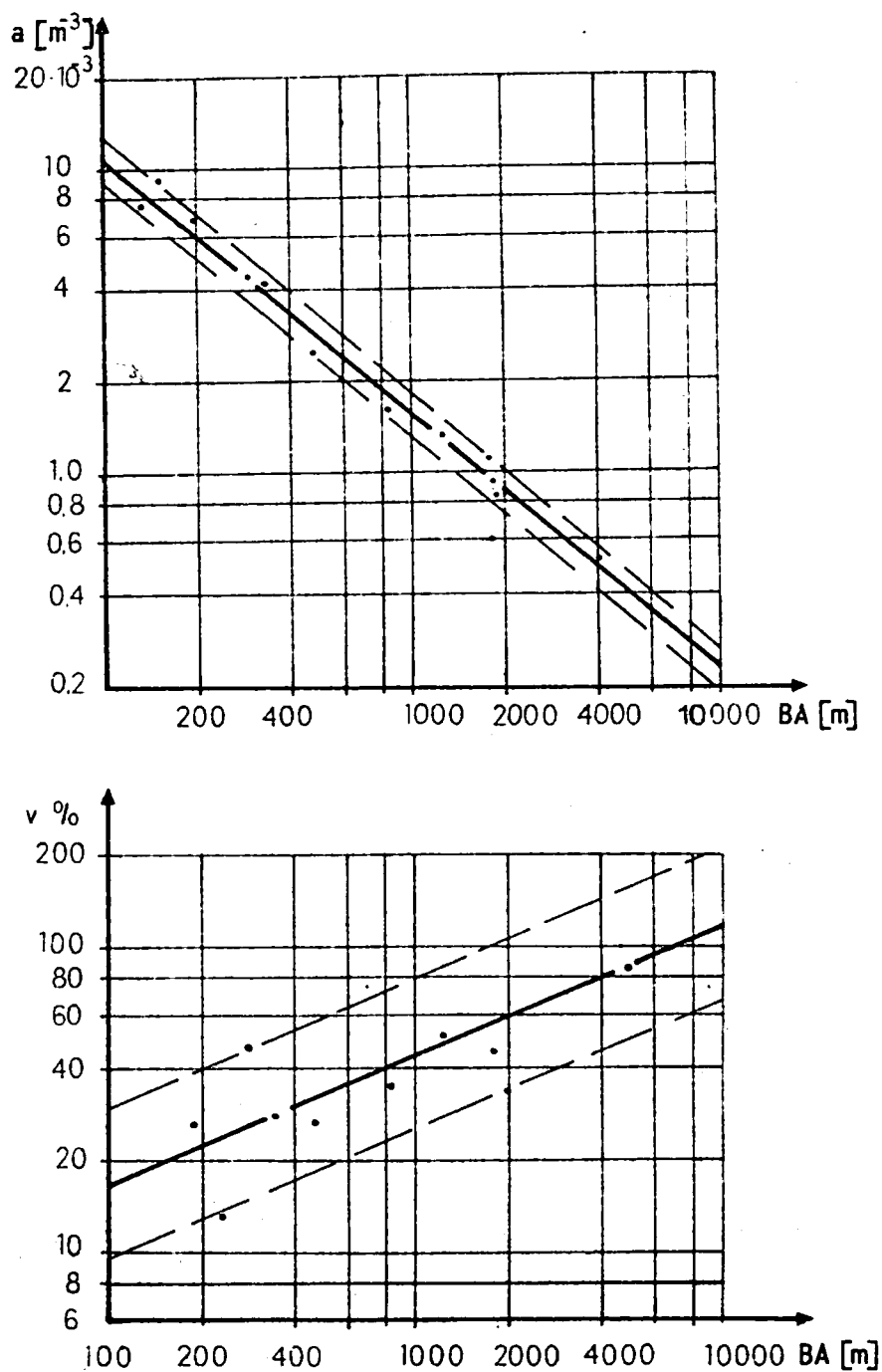


Bild 28

Abhängigkeit der Parameter a und v der Filtrationsinhomogenität vom Bohrabstand BA nach BAMBERG/GARLING (1977)

pleistozänen Lockersedimenten bereits bei Probenabständen von $< 1 \dots 2$ m eine völlig chaotische Veränderlichkeit aufweist.

Zwei wesentliche Hinweise lassen sich hieraus ableiten:

- Mit kleiner werdendem Untersuchungsobjekt muß die Informationsdichte größer werden, um einen repräsentativen Mittelwert

gleicher Genauigkeit zu erhalten. Eine Optimierung der erforderlichen Probenabstände ist möglich.

- Parameterbestimmungsverfahren mit unterschiedlichem Einflußbereich sind für unterschiedliche Betrachtungsgrößen repräsentativ, haben also verschiedene Gültigkeitsbereiche. So ist ein k -Wert aus einer punktförmigen Laborprobe ggf. nur für einen kleinen Bereich innerhalb einer Bohrung aussagekräftig, ein Pumpversuch erfaßt außer der Bohrung noch einen größeren Bereich der Umgebung.

Im Zusammenhang mit analogen Betrachtungen wird von ILJIN u. a. (1971) eine Klassifikation der Filtrationsinhomogenität in Abhängigkeit vom Untersuchungsobjekt dargestellt (siehe Bild 29).

- Klasse 0 (im Diagramm nicht angegeben)
bezieht sich auf Veränderungen in Abständen > 10 km und erfassen somit ganze geologische Formationen
- Klasse I Veränderungen in der Größenordnung zwischen 10 m und 10 km sind verbunden mit exogenen und Faziesänderungen und erfassen die Struktur sowie Textur eines Gesteinsmassives
- Klasse II Veränderungen im cm-Bereich bis zu 100 m werden i. allg. durch Pumpversuche erfaßt und charakterisieren Unterschiede in Porosität und Makroklüften, Schichtung innerhalb des Profils; nicht Mikroklüfte und -poren. Erweiterung der Aussage durch Vergrößerung von Absenkung, Reichweite und Pumpdauer
- Klasse III Veränderungen im mm- bis cm-Bereich durch Mikroklüftung, unterschiedliche Poren und Klüfte, unterschiedliche Form und Größe der Porenkanäle. k -Wert-Ermittlung mit Laboruntersuchungen, wobei Probenvolumen etwa dem Gesamtvolumen entspricht, für das es repräsentativ ist

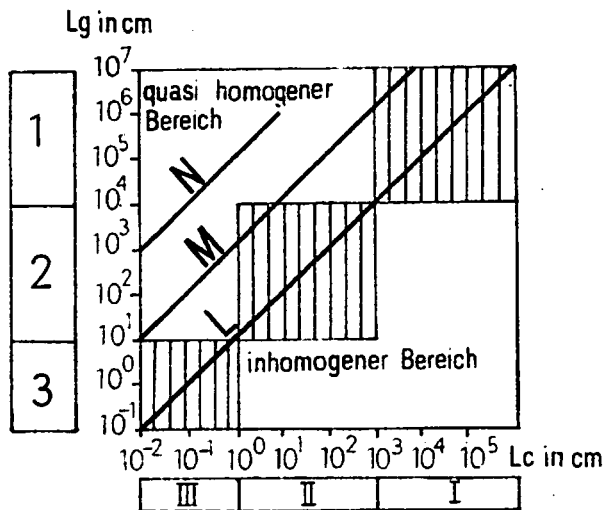


Bild 29

Diagramm der Filtrationsinhomogenität der Gesteine nach ILJIN u. a. (1971)

- Lc - Größe (Läng.) der die Inhomogenität charakterisierenden Elemente, wie Poren, Klüfte, Schichten verschiedener Durchlässigkeit, wasserführende Horizonte, ganze Grundwasserleiter (Gesteinsmassive)
- Lg - Einflußbereich der Beprobung (Probe) (Laborprobe, Felduntersuchung, demonstrativer Nachweis)
- I, II, III - Inhomogenitätsklassen
- N - geometrischer Ort der Punkte, der charakterisiert wird durch das Verhältnis der Inhomogenitätsbedingungen und der Untersuchungs-(Proben)bedingungen, bei welchen man als Ergebnis der Versuche eine Normalverteilung der k -Werte erhält.
- M - dito für Maxwell-Verteilung
- L - dito für Lognormal-Verteilung
- 1 ($10^6 - 10^4$) Einflußbereich für Bauwerke
- 2 ($10^4 - 10^1$) Proben im Massiv
- 3 ($10^1 - 10^{-1}$) Untersuchung von Einzelproben (Mustern)

6. Genauigkeit der k-Wert-Bestimmungsverfahren

Für die praktische k-Wert-Bestimmung stehen eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, die sich hinsichtlich

- ihrer theoretischen Grundlagen,
- der jeweils erfaßten Größe des Untersuchungsraumes (vgl. 5.2.),
- ihrer Gültigkeits- und Genauigkeitsgrenzen,
- des erforderlichen Aufwandes

z. T. grundlegend unterscheiden. Prinzipiell kann man die Verfahren in Labor-, Feld- und indirekte Methoden einteilen, die ihrerseits entsprechend Tabelle 8 weiter untergliedert werden können. Eine Zusammenstellung und Bewertung einzelner Verfahren erfolgt in Anlage 3.

Tabelle 8: Verfahren zur k-Wert-Bestimmung (vgl. Anlage 3)

1. Labormethoden
 - 1.1. Direkte Laborversuche (Permeanetermessungen)
 - 1.2. Mittelbare Bestimmungsmethoden
 - 1.2.1. Berücksichtigung des Korndurchmessers
 - 1.2.2. Berücksichtigung von Korndurchmesser und Porenanteil
 - 1.2.3. Ermittlung aus Ergebnissen von Druckversuchen
 - 1.2.4. Ermittlung aus sonstigen petrophysikalischen Gesteinskennwerten
2. Feldmethoden
 - 2.1. Pumpversuche
 - 2.2. Hydraulische Bohrlochversuche
 - 2.3. Geophysikalische Bohrlochmessungen
3. Indirekte Methoden
 - 3.1. Ermittlung aus Wasserhaushaltsgrößen
 - 3.2. Indirekte Parameterquantifizierung mittels Simulationsmethoden

Generell werden den Feldmethoden - und hierbei besonders den methodisch und theoretisch am besten ausgearbeiteten Pumpversuchsverfahren - die besseren Ergebnisse gegenüber den Labormethoden zugesprochen. Nach Meinung verschiedener Autoren sollten allerdings zunehmend auch andere Verfahren berücksichtigt werden, die hinsichtlich ihrer Genauigkeit als gleichrangig bewertet werden (z. B. ILJIN u. a. Indikatormethoden, indirekte Parameter-

quantifizierung) oder bei ausreichender Genauigkeit einen wesentlich geringeren Aufwand erfordern (z. B. Bohrlochversuche, geophysikalische Bohrlochmessungen). Eine weitere Konkretisierung von Auswahlkriterien, verbunden mit einer vergleichenden Testung der einzelnen Verfahren in Objekten, steht noch aus. Derzeitige Kenntnisse über die Genauigkeit der Verfahren sind in den Tabellen 9 bis 11 sowie Anlage 3 dokumentiert.

6.1. Labormethoden

6.1.1. Permeametermessungen

Für die in der hydrogeologischen Erkundung recht selten verwendeten direkten laborativen Untersuchungen von Gesteinsproben sind die Meßfehler geringer im Vergleich zu den möglichen methodischen Fehlern (vgl. Tabelle 9). Da allerdings durch richtigen Einsatz jeweils geeigneter Laborverfahren sowie durch entsprechende methodische Maßnahmen (vgl. Anlage 3) ohne große Schwierigkeiten beide Fehlerarten gering gehalten werden können (Laborverfahren gelten generell als recht genau), muß als Hauptproblem die unzureichende Repräsentanz der Ergebnisse infolge der geringen Probengröße angesehen werden. Nur in Ausnahmefällen wird (je nach Filtrationsinhomogenität) das Ergebnis einer Laborprobe Vorstellungen über das gesamte Massiv des Grundwasserleiters vermitteln können. Ggf. ist dies überhaupt nicht möglich (z. B. Festgestein, Böden mit Trockenrissen und Wurmkanälen). Im Zusammenhang mit der Repräsentanz wäre hierbei auch die richtige Interpretation der Lagerungsverhältnisse zu sehen.

Der Ersatz teurer Feldversuche (PV) durch eine große Anzahl von Laborversuchen erscheint für Grundwassererkundungen generell nicht möglich. Laborwerte können lediglich eine erste Orientierung im Untersuchungsgebiet geben und dienen als zusätzliche Möglichkeit zur Einengung der nach anderen Verfahren ermittelten hydrogeologischen Parameter resp. zu deren Interpretation.

Tabelle 9: Laborversuche

Fehlerursachen	Fehler des k-Wertes	Vorteile	Nachteile
<p><u>1.1. Permeametermessungen</u></p> <p>a) <u>Meßfehler von</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge der Bodensäule • Durchflußquerschnitt • Durchflußmenge • Druckhöhenverlust • Temperatur 	<p>nach BEYER für</p> <ul style="list-style-type: none"> • gröberes Material ($k = 2 (10^{-4} \dots 10^{-3})$ m/s Fehler ≤ 25 % • feineres Material ($k = 2 (10^{-5} \dots 10^{-4})$ m/s Fehler ≤ 15 % 	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Auswertung • bei Ausschaltung der unter b) und c) angegebenen methodischen Fehler gilt Verfahren als recht genau für den untersuchten Punkt • für feinere und bindige Materialien derzeit kaum andere Verfahren vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Gültigkeit für geringen Abschnitt des Grundwasserleiters (Punktdurchlässigkeit) • gestörte Probe ohne komplexe Berücksichtigung des Gefüges • Unklarheit hinsichtlich Filtrationsrichtung (k_h schwer bestimmbar)
<p>b) <u>Fehlerhafte Versuchsmethodik</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • ungenügende Entlüftung und Wassersättigung • Strömungsverluste durch Randeffecte (siehe Anlage 3, Abschn. 1.1.) 	<p>3 ... 300 % (nach KIRKHAM bis 3000 %!)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • für feinere und bindige Materialien derzeit kaum andere Verfahren vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • ungünstiger Einfluß verschiedener Wasserbeschaffenheit • großer Unterschied zu natürlichen Gefälleverhältnissen
<p>c) <u>Fehler zwischen natürlichen Verhältnissen und Probe</u></p> <p>Unterschiede zwischen lockerster und dichtester Lagerung</p> <p>infolge Zerstörung der Gesteinsstruktur (für Feinsand)</p> <p>infolge Abnahme der natürlichen Erdspannung</p>	<p>nach BEYER</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abweichungen vom Mittelwert 20 ... 50 % • Maximalabweichung 50 ... 100 % <p>nach ILJIN u. a.</p> <ul style="list-style-type: none"> • ca. 25 % • k-Wert-Vergrößerung bei bindigem Material (bei Tongehalt $> 10\%$ gravierende Fehler) 		<ul style="list-style-type: none"> • ungünstiger Einfluß verschiedener Wasserbeschaffenheit • großer Unterschied zu natürlichen Gefälleverhältnissen

6.1.2. Mittelbare Bestimmungsmethoden (k-Werte aus Siebanalysen)

Infolge der sehr einfachen und raschen Bereitstellung von Informationen, ggf. in großer Anzahl, haben die k-Wert-Verfahren aus Siebanalysen, besonders nach HAZEN, BEYER und ZIESCHANG, in der Grundwassererkundung der DDR große Verbreitung gefunden. Die theoretische Begründung dieser Formeln wurde unter 3.1.1. vorgenommen. Allerdings vermindern die dort getroffenen Annahmen sowie verfahrensspezifischen Voraussetzungen generell die Aussagefähigkeit der Verfahren.

Wie aus Tabelle 10 ersichtlich, liegen die Hauptfehlerquellen der Verfahren in der unsachgemäßen Probenahme aus Bohrungen. Allerdings liegen derzeit gerade hier die erkundungsmäßigen Schwachstellen. So vermerken SCHÜLER/HELMERT (1979), daß für alle Bohrverfahren die Technologie der Probenahme völlig ungenügend sei und weder die erforderlichen Auffangvorrichtungen vorhanden sind noch die notwendigen Mindestentnahmeabstände eingehalten werden, d. h. die Forderungen der einschlägigen Standards (TGL 23977) nicht konsequent erfüllt werden.

Da die Siebanalysen ebenso wie die Permeametermessungen nur eine punktförmige Aussage über den Grundwasserleiter erlauben, gelten hinsichtlich ihrer Repräsentanz sinngemäß die Angaben unter 6.1.1., und es machen sich i. allg. eine Vielzahl von Einzeluntersuchungen erforderlich. In diesem Zusammenhang verdienen Hinweise zur Mischprobenbildung sowie zu der unter 3.2.6. angesprochenen Problematik der arithmetischen (gewogenen) Mittelbildung besondere Beachtung. Eine häufig vorgenommene Vermischung der Einzelproben eines ganzen Profils mit anschließender Entnahme einer Einzelprobe für Siebanalysen wird von BRANDT (1976) abgelehnt, da eine Mischprobe gegenüber der Summe der Einzelproben (gewogenes Mittel) stets zu kleine k-Werte ergibt. SCHNEIDER (1973) kommt allerdings hinsichtlich des gewogenen Mittels zu der Aussage, daß die Verwendung von Siebanalysen-k-Werten für ganze Bohrprofile kaum möglich sei, da eine hydraulische Bewertung der einzelnen Schichten nach ihrer Höhenlage nicht durchführbar sei. SCHNEIDER räumt eine Anwendbarkeit dieser Verfahren nur für Grundwasserleiter mit weitgehend homogenen Sanden ein.

Tabelle 10: Laborversuche

Fehlerursachen	Fehler des k-Wertes	Vorteile	Nachteile
<p><u>1.2. k-Werte aus Siebanalysen (nach GARLING, 1976)</u></p>			
<p>a) <u>Ungenügende Probenahme</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • durch Ausspülung, Anreicherung, Klassierung, Durchmischung des Bohrgutes bei Trockenbohrverfahren • Abweichung zwischen Trockenbohrung und Stoßentnahme • Entleeren des Bohrwerkzeuges auf Erdboden ohne Auffanggerät • Feinkornausspülung aus FK1 bis M3 bei Spülbohrverfahren • ungenügendes Vergleichmäßigen des abgelagerten Materials vor Entnahme der Sieblaborprobe 	<p>Lösen des Gesteins mit Ventilbohrer u. ä. nach MOSLER</p> <p>Feinkornausspülung in GS und FS + (25 ... 35) %</p> <p>Feinkornanreicherung in GS u. MS - (10 ... 25) %</p> <p>60 ... > 80 %</p> <p>+ 65 %</p> <p>+ 80 ... 100 %</p> <p>max. > 1000 % (meist zu grobes Material entnommen)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • relativ geringer Aufwand und geringe Kosten • schnelle Einschätzung der Durchlässigkeit möglich • einfache Auswertung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung einer Punktdurchlässigkeit • Richtungsabhängigkeit der Durchlässigkeit unberücksichtigt • Lagerungsichte und Schichtung unberücksichtigt • Annahme annähernder Kugelform der Körnung für gröbere Materialien nicht erfüllt • Erfassung des Feinkornanteils zweifelhaft • Vernachlässigung strömungsmechanischer Besonderheiten
<p>b) <u>Probenuntersuchung (Siebprozeß)</u></p>	<p>nach BRANDT spielen Fehler aus dem Siebprozeß keine dominierende Rolle (< 5 %)</p>		

Auch andere Autoren (z. B. DÜRBAUM 1967, SCHENK 1972) schränken den Wert bzw. die Anwendungsmöglichkeit von Siebanalysenergebnissen wegen der Nichtbeachtung von Schichtung, Laminenstruktur, Anisotropie stark ein.

Ebenso wie Permeameterergebnisse sollten Sieb-k-Werte in erster Linie für gröbere Einschätzungen (z. B. während der Suche und Vorerkundung) verwendet werden, wobei eine gebietsspezifische Eichung z. B. an Pumpversuchen vorgenommen werden sollte. Ähnlich empfiehlt SEILER (1973), die in den Gleichungen (25) bzw. (28) angegebenen Faktoren der Porengeometrie σ , C , $f(n)$ für geologisch abgegrenzte Räume jeweils von Fall zu Fall zu bestimmen, da alle Variablen der Porengeometrie von Lockergesteinen verschiedener Herkunft weder einzeln noch in ihrem Zusammenspiel in einheitlichen Konstanten leicht erfaßbar seien.

Besonderen Wert werden Siebanalysen-k-Werte für Analogie- und Vergleichsuntersuchungen behalten, so daß mit einem Verzicht auf solche Ergebnisse künftig nicht zu rechnen ist. Dem Problem der sorgfältigen Probenahme ist deshalb größere Bedeutung beizumessen.

6.2. Feldmethoden

6.2.1. Pumpversuche

Im Rahmen hydrogeologischer Erkundungsarbeiten stellen Pumpversuche zur Gewinnung hydrogeologischer Parameter des Grundwasserleiters sowie für den direkten qualitativen und quantitativen Vorratsnachweis die wesentlichste und beste Möglichkeit der Datengewinnung dar. Ihr wesentlicher Vorteil besteht in der Komplexität sowohl der gewinnbaren Informationen als auch der Aussagen über den untersuchten Strömungsraum. Allerdings resultieren gerade aus der Erfassung eines größeren Raumes mit im einzelnen unbekanntem Randbedingungen, deren Auswirkungen nur in den Messungen bzw. im k-Wert integriert enthalten sind, aber auch aus den vielfältigen Messungen selbst eine Reihe von Fehlermöglichkeiten, die in Tabelle 11 angegeben sind.

Tabelle 11: Feldversuche

Fehlerursachen	Fehler		Vorteile	Nachteile
	der Messung	des k-Wertes		
2.1. Pumpversuche				
<p>a) <u>Meßfehler</u> durch Umwelteinflüsse, Instrumentenfehler, individuelle Fehler:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser des Brunnens (Unterschiede Bohrung/Filter, Erosion u. Auswaschung) • Geometrie der Versuchsanlage (Abstände GWBR-VBR, Berandung, ggf. Reichweite) • Teufenmessungen (GWL-Mächtigkeit, Filterlänge) • Wasserstandsmessungen (stabiler u. dynamischer Wasserstand, Meßgeräte, Meßtiefe) • Wassermengenmessung (Meßgeräte, Förderleistung) • Zeitmessungen 	<p>nach ILJIN u. a. ADAM, KERKIS $\delta(r_0)$ 3 % (ggf. größer)</p> <p>Abstand VBR - GWBR $\delta(r_1) \approx 0,1$ % Abstand VBR - Uferlinie $\delta(r_2) \approx (1 \dots 3)$ % je nach Bohrverfahren u. Schichtmächtigkeit $(0,1 \dots 3)$ % < 1 % des Meßbereiches durch Aufhängeseil $(0,1 \dots 5)$ % $\delta(Q) \approx \pm (1 \dots 5)$ % Pumpenschwankungen ≤ 10 % $\delta(t) < 0,1$ %</p>	<p>nach ILJIN gilt für vollkommene Brunnen</p> <ul style="list-style-type: none"> • bei stationärer Auswertung $\delta(k)$ max. 20% • bei nichtstationärer Auswertung $\delta(k)$ max. 30% 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung eines relativ großen Raumes des GWL • Möglichkeit der Anpassung an konkrete hydrogeologische Fragestellung und tatsächliche Förderbedingungen • Meßwerte integrieren alle Einflußgrößen des Strömungsfeldes (Lagerung, Randbedingungen usw.) • ggf. Interpretation der Abweichungen von theoretischen Annahmen möglich • Probleme der lokalen Inhomogenität sind von sekundärer Bedeutung (im Gegensatz zu Laborverfahren) 	<ul style="list-style-type: none"> • natürliche Verhältnisse stimmen nur selten mit theoretischen (mathematischen) Annahmen überein • starke Abhängigkeit der Ergebnisse von der Qualität der technischen Arbeiten (Brunnenausbau, Bohrungskolmation usw.) • keine Berücksichtigung realer Formen des Gesteins oder der Hohlräume • großer Aufwand an Energie und Material
<p>b) <u>Methodische Fehler</u> durch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nichtzutreffen der gemachten Annahmen • ungenaue Berechnungsmethoden • Auswahl falscher Berechnungsverfahren • falsche Interpretation u. Auswertg. d. Ergebnisse 	<p>nach MARASEK; KERKIS $\approx \pm 50$ % und mehr bei richtigem Einsatz der jeweils zutreffenden Berechnungsverfahren nach ILJIN method. Fehler $\delta(k) \approx (5 \dots 12)$ %</p>			

6.2.1.1. Meßfehler einfluß bei Pumpversuchen

Meßfehler treten gemäß Abschnitt 5.1. und Tabelle 11 insbesondere in Verbindung mit Längenmessungen (Geometrie der Versuchsanlage, Teufen, Wasserstände) und Mengenmessungen auf. Ihr Einfluß auf den k -Wert wurde von MARASEK (1966) sowie ILJIN u. a. (1971) näher untersucht, wobei letzterer auf der Grundlage der Gleichungen (43) für eine Auswertung nach

- stationären Verfahren einen summarischen Fehler von (2 ... 20) %
 - instationären Verfahren einen Fehler bis zu 30 %
- ermittelte.

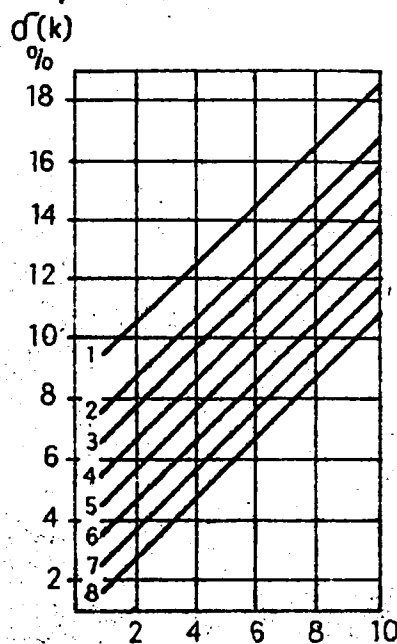
Es wurde als wesentlichster Fehlereinfluß die Messung des Förderstromes (Mengenmessung) bestimmt. Daneben sind noch Meßfehler der Absenkung sowie (besonders für gespannte Verhältnisse) die Bestimmung der Grundwasserleiternächtigkeit von Bedeutung.

Im Ergebnis von Variantenuntersuchungen entwickelten ILJIN u. a. die in Bild 30 angegebenen Nomogramme zur Einschätzung des relativen Fehlers des Durchlässigkeitskoeffizienten $\sigma(k)$ infolge von Meßfehlern. Wichtige Hinweise zu Meßfehlern, z. B. infolge Pumpenausfalls, Veränderung des Förderstromes, Fehler der Meßinstrumente, unsachgemäßer Meßdurchführung, bei Absenkungs- und Wiederanstiegsmessungen sind ggf. durch graphische Darstellung der Beziehung $s = f(\lg t)$ zu erhalten. Solche Meßfehler können die Konstruktion einer Ausgleichsgeraden erschweren oder unmöglich machen (siehe Bilder 31 und 32). Die Konstruktion einer Mittelkurve ist nach SAMSONOW (1969) hierbei nur sinnvoll, wenn die aus den äußeren möglichen Geradenvarianten (Bild 31a) bestimmten k -Werte nicht mehr als 40 % voneinander abweichen. Anderenfalls sind die Pumpversuche als Ausschuß zu verwerfen.

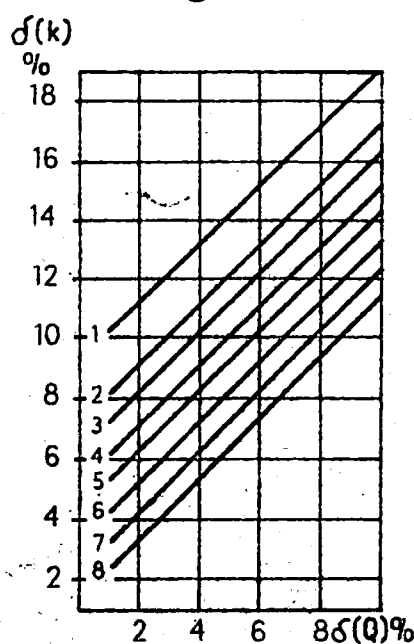
Aus dem Ergebnis, daß der Einfluß der Meßfehler auf den k -Wert für stationäre Auswertungen geringer ist als für nichtstationäre, wird geschlossen, daß letztgenannte Auswertungsverfahren genauere Messungen erfordern. In diesem Zusammenhang sollte, wie bereits ADAM (1977) forderte, besonders der Verbesserung der Mengenmessung Aufmerksamkeit geschenkt und darüber hinaus generell eine weitere Qualitätserhöhung und Automatisierung von Meßmethoden angestrebt werden.

Die derzeit zumeist verwendeten ungeeichten und z. T. völlig deformierten Wassermeßkästen in Verbindung mit Einheitstabellen

a) stationäres Filtrationsregime



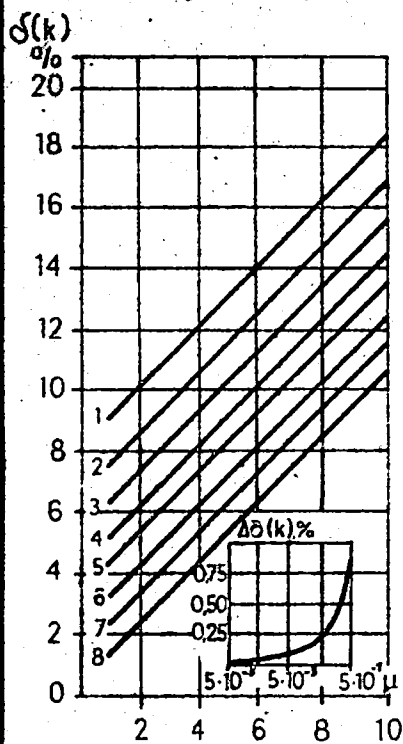
für $\sigma(r_s) = 1\%$
 $\sigma(r_o) = 3\%$
 $2r_s/r_o = 1000$



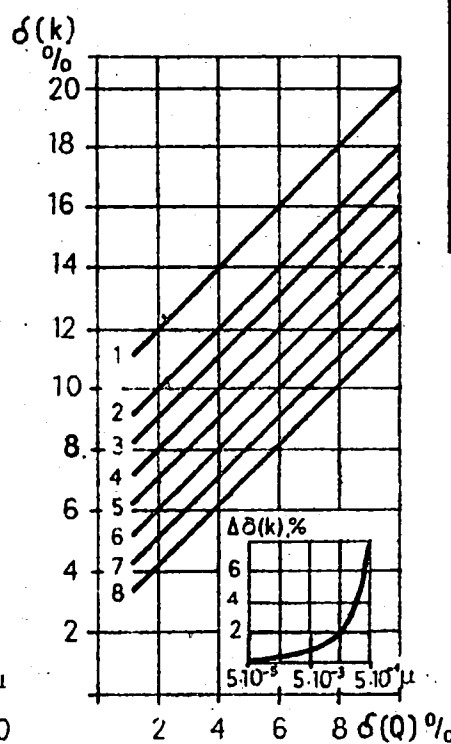
für $\sigma(r_s) = 3\%$
 $\sigma(r_o) = 3\%$
 $2r_s/r_o = 100$

$$k = \frac{Q}{2\pi m s_o} \cdot \ln(2r_s/r_o)$$

b) nichtstationäres Filtrationsregime
 ($\sigma(t) = 0,1\%$; $\sigma(r) = 0,1\%$;
 $n = 5 \cdot 10^{-3}$)



für $\sigma(a) = 1\%$



für $\sigma(a) = 10\%$

$$k = \frac{Q}{4\pi s, m} \left[-Ei \left(\frac{-m^2}{4 a v} \right) \right]$$

Annahme		
Nr.	$\sigma(s) \%$	$\sigma(m) \%$
1	5	3
2	5	1
	1	5
3	3	3
4	3	1
	1	3
5	3	0,1
	0,1	3
6	1	1
7	1	0,1
	0,1	1
8	0,1	0,1

- r_s - Abstand VBR - Berandung bzw. VBR - GWLR
- Q - Förderstrom
- s - Absenkung
- m - Grundwasserleitermächtigkeit
- t - Zeit
- a - geohydraulische Zeitkonstante

Bild 30
 Nomogramme nach ILJIN (1971)

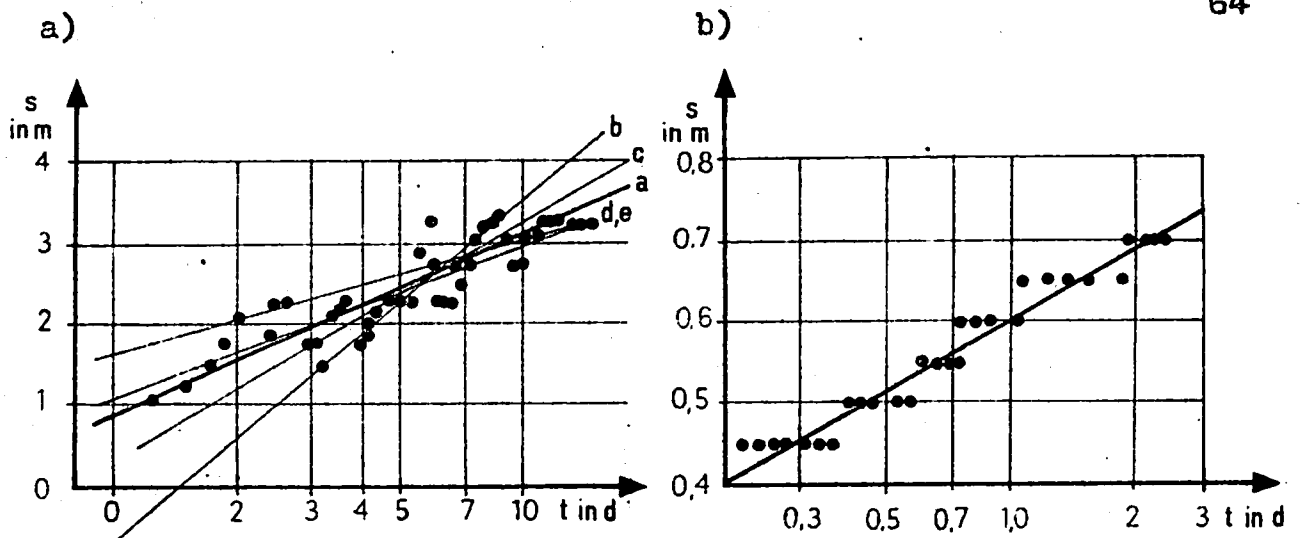


Bild 31

Beispiele für qualitätsgeminderte PV-Ergebnisse
infolge Förderstromschwankungen, Instrumentenfehler,
unsachgemäßer Messungen

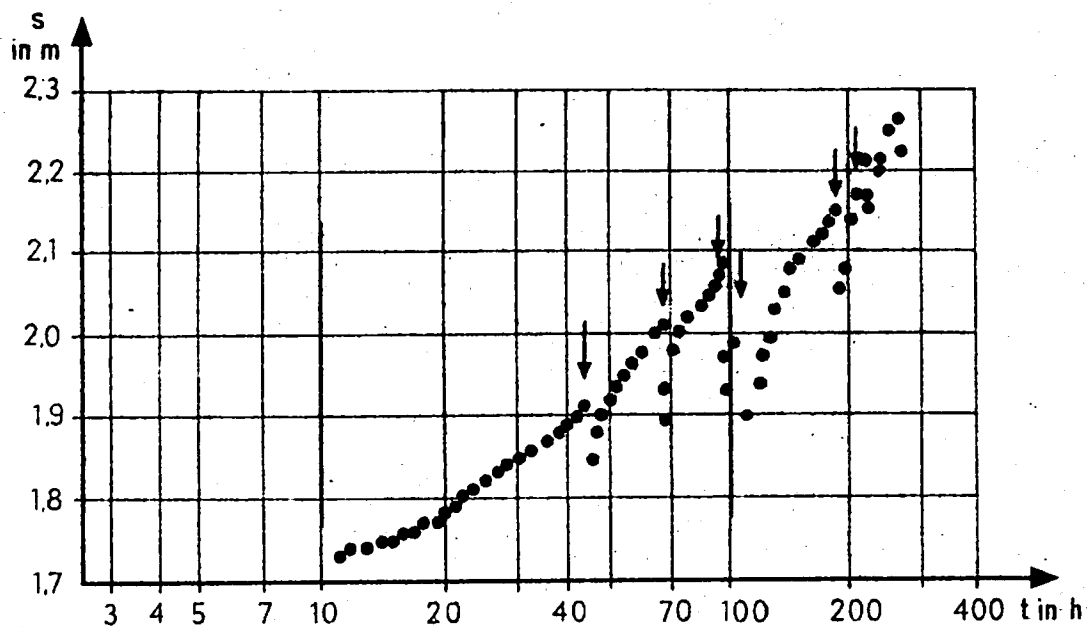


Bild 32

Beschränkte Auswertbarkeit durch Pumpenausfall

unbekannter Herkunft müssen unter diesem Aspekt abgelehnt werden, zumal ein jahrelang bewährter bestehender Standard über Typenmeßkästen mit Eichkurven (NBS 200) unverständlicherweise außer Kraft gesetzt wurde.

6.2.1.2. Einfluß methodischer Fehler

Die Pumpversuchsauswertung läßt sich als spezielles Problem der Lösung einer umgekehrten Aufgabe interpretieren. Allerdings ist eine diesbezügliche explizite Lösung der die Strömungsvorgänge beschreibenden komplizierten Differentialgleichungen nur bei Annahme einfachster Randbedingungen möglich, wie sie jedoch in der Natur i. allg. nicht vorliegen.

Solche Annahmen sind beispielsweise

- Grundwasserleiter einschichtig, homogen, isotrop, inkompressibel; unendlich horizontal ausgedehnt, gleichbleibende Mächtigkeit;
- Grundwasserleitersohle horizontal, eben, undurchlässig;
- ungestörter Grundwasserspiegel horizontal (Vernachlässigung des natürlichen Gefälles);
- Grundwasser ist homogen, isotrop, inkompressibel, verdunstet nicht; füllt Poren des Grundwasserleiters lückenlos aus;
- Brunnen durchdringt gesamten Grundwasserleiter bis Sohle (vollkommener Brunnen), Anströmung gleichmäßig axialsymmetrisch;
- Brunnendurchmesser, Kiesschüttung und Filterkolmation nicht beachtet;
- innerhalb Reichweite des Brunnens außer Entnahme keine Zu- und Abflußänderung (z. B. Versickerung, Verdunstung);
- Porenentwässerung proportional Absenkung ohne zeitliche Verzögerung durch Kapillarrückhaltung (Vernachlässigung der allmählichen Entleerung des Grundwasserleiters bei Absenkung bzw. der Tatsache, daß Absenkung nicht gleichmäßig erfolgt);
- Geschwindigkeitspotential im Brunnen an jeder Stelle gleich, d. h. Brunnenfilter ist Potentialfläche; Brunnenanströmung radialsymmetrisch;
- beim Abpumpen sind Spiegelabsenkungen klein gegenüber Grundwassermächtigkeit; vertikale Geschwindigkeitskomponenten \ll horizontale: vernachlässigbar;
- laminare Strömung zum Brunnen wird vorausgesetzt, d. h. Gültigkeit DARCY;
- abgesenkter Wasserspiegel mündet ohne Sprung (Sickerstrecke bzw. Filterwiderstand) in Brunnen ein;
- Vernachlässigung von Druck- und Temperaturabhängigkeit;
- Annahme stationärer Strömungsverhältnisse.

Obwohl eine Reihe dieser die theoretischen Annahmen verfälschenden Faktoren zusätzlich und mit z. T. erheblichem Mehraufwand berücksichtigt werden kann (vgl. TGL 23864/02 - /10 und Anlage 3, Abschnitt 2.1.) und außerdem die meisten dieser Annahmen eine Verkleinerung des k-Wertes bewirken (wodurch i. allg. eine erhöhte Sicherheit hervorgerufen wird), können die noch verbleibenden methodischen Fehler gravierend und bei weitem größer als die Meßfehler sein.

Eine komplexe Untersuchung und Bewertung aller dieser Einflüsse auf den k-Wert erfolgte bisher noch nicht, wohl aber wurden einige der wichtigsten Annahmen sehr intensiv untersucht. Von grundlegender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das Erkennen und Berücksichtigen der äußeren Berandungen des Strömungsfeldes (siehe Anlage 3, Abschnitt 2.1.).

Sehr wesentlichen Einfluß auf das Versuchsergebnis hat auch die Art der Versuchsanlage. Es gilt als erwiesen, daß k-Werte aus Einzelbrunnen mit größeren Fehlern behaftet sind als Ergebnisse aus Versuchsbrunnengruppen. Ursachen hierfür sind beim Einzelbrunnen in der Unvollkommenheit, der Brunnenfilterdurchlässigkeit (Ekin-Effekt), den Kolmationserscheinungen, aber auch dem gesamten Strömungsverhalten zu suchen. So weist SAMSONOW (1969) in Bild 33 eine Streuung von $> + 50 \%$ bzw. $- 20 \%$ nach.

ANTONOW (1975) bestätigt das Ergebnis, daß Werte aus Einzelbrunnen i. allg. zu klein sind und weist bei Spülbohrungen mit Tonspülung (eine Enttonung ist nur bis 15% möglich) noch erheblich größere Abweichungen bis zu 300% nach.

Aus den vorangegangenen Ergebnissen sollte man gewisse methodische Konsequenzen ziehen und bei der Projektierung von Pumpversuchen von vornherein auf die Anordnung zusätzlicher Grundwasserbeobachtungsrohre sowie auf eine möglichst einfache Auswertbarkeit achten.

Die bereits erwähnte Tatsache, daß sich vorhandene aber unbekannte geologische Randbedingungen und Anomalien im Pumpversuchsergebnis nur indirekt in Änderungen von Absenkung und Förderstrom widerspiegeln, kann zu grundlegenden Mißdeutungen und methodi-

sehen Fehlern bei der Auswertung führen. Aus diesem Grunde muß nachdrücklich vor einer schematischen Anwendung der verfügbaren

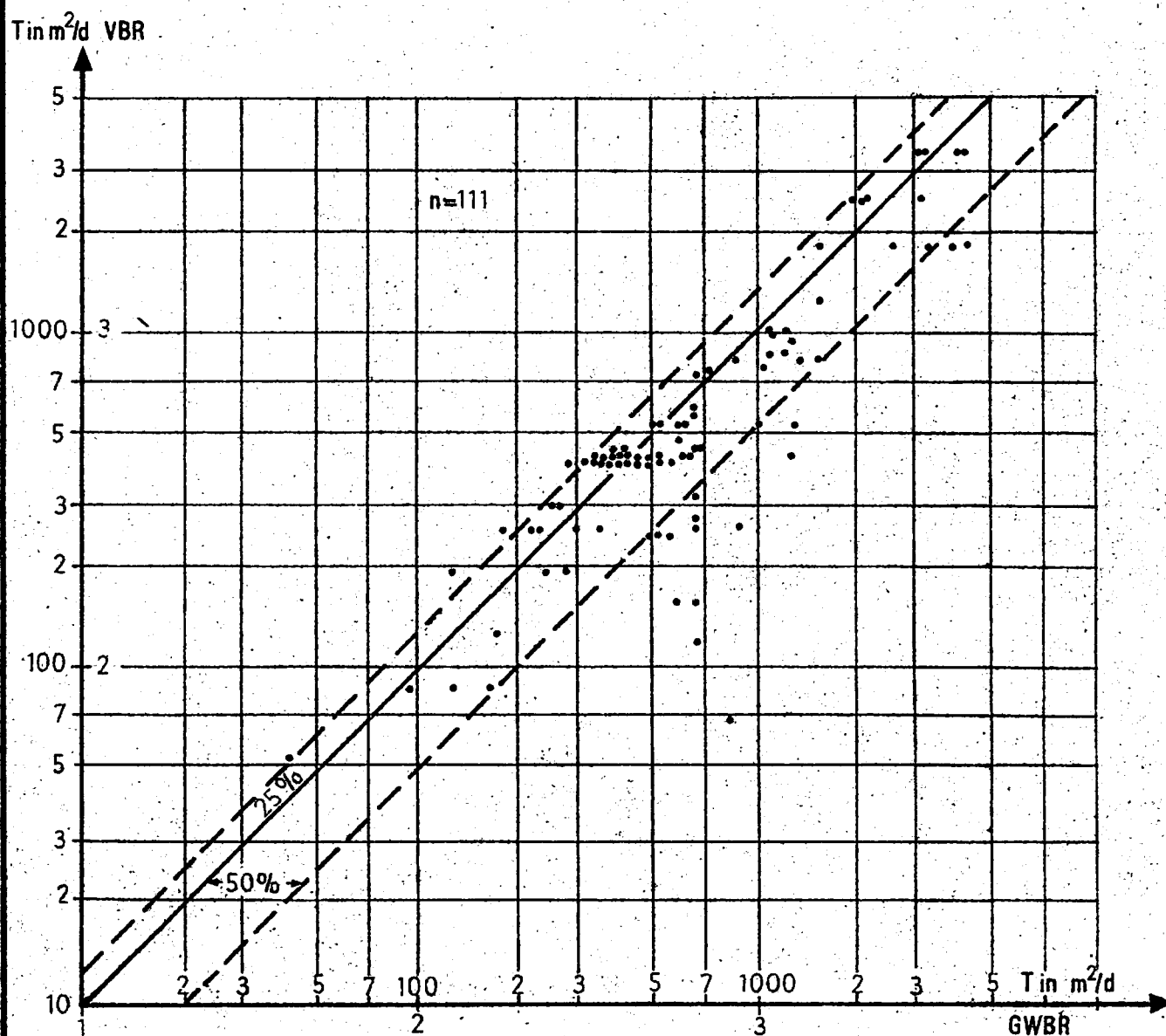


Bild 33

Graphik zum Vergleich der Transmissibilität, die anhand von Angaben aus Versuchs- und Beobachtungsbrunnen (GWBR) bestimmt wurde nach SAMSONOW (1969)

Auswertungsverfahren (auch der TGL 23864) gewarnt werden. Man sollte, entsprechend den Empfehlungen von SAMSONOW (1969), anhand der Ergebnisse eines jeden Pumpversuches eine sorgfältige Diagnostizierung in Verbindung mit einer geologischen Analyse und ggf. modelltechnischen Simulationen vornehmen. Wichtige Hin-

weise können hierfür aus dem Schema von DABROWSKI/PRZYBYLEK (1978) entnommen werden, das in Anlage 4 wiedergegeben ist. Man kann daraus ersehen, daß unterschiedliche Kurvenverläufe auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sind, andererseits aber unterschiedliche hydrogeologische Randbedingungen auch zu analogen bzw. ähnlichen Deformationen der Auswertungskurven führen können. Es ist also nicht möglich, nur aus der Anomalie der Kurve die Natur der Anomalie zu erkennen.

In diesem Zusammenhang ist besonders zu beachten, daß bei auftretenden Berandungen 2 verschiedene k-Werte ermittelt werden können:

- der wirkliche Parameter, der sich aus den Messungen vor Erreichen der Randbedingung ergibt (Anfangsabschnitt) und
- der allgemeine Parameter (nach SAMSONOW), der die Einwirkung der Grenze dokumentiert (Endabschnitt) und dessen Umrechnung auf den wirklichen Parameter in TGL 23864/07 nur für einfache Randbedingungen vorgesehen ist. Fehlinterpretationen sind hierbei auch möglich, sofern sich der für den allgemeinen Parameter verwendete Kurvenabschnitt mit dem Förderstrom ändert, wobei besonders Auswertungen im Bereich offener Grenzen (Vorfluter) gefährdet sind.

Schwerwiegende Fehlschlüsse treten bei Versuchsbrunnen in unmittelbarer Nähe der Berandung auf, bei denen praktisch der den wahren k-Wert charakterisierende Anfangsabschnitt nicht vorhanden ist, aber kein Knick der Kurve auf eine Berandung hindeutet. Um dem vorzubeugen, wurde in TGL 23864/02 eine Graphik nach BEIMS/ESCHNER zur Bestimmung erforderlicher Abstände zwischen Brunnen und GWBR angegeben, bei denen die Darstellungsmöglichkeit eines gewissen Anfangsabschnittes garantiert sein soll (Bild 34).

Ein nichtlinearer Verlauf der Kurve $s = f(\lg t)$ kann auf einen schlauchförmigen, sehr eng begrenzten Grundwasserleiter hinweisen und ebenfalls Aussagen zu wirklichen k-Werten bedeutend erschweren.

Bei der Auswertung des Wiederanstieges entstehen ggf. Fehler durch ein Ignorieren der Pumpdauer vor dem Abschalten der Pumpe,

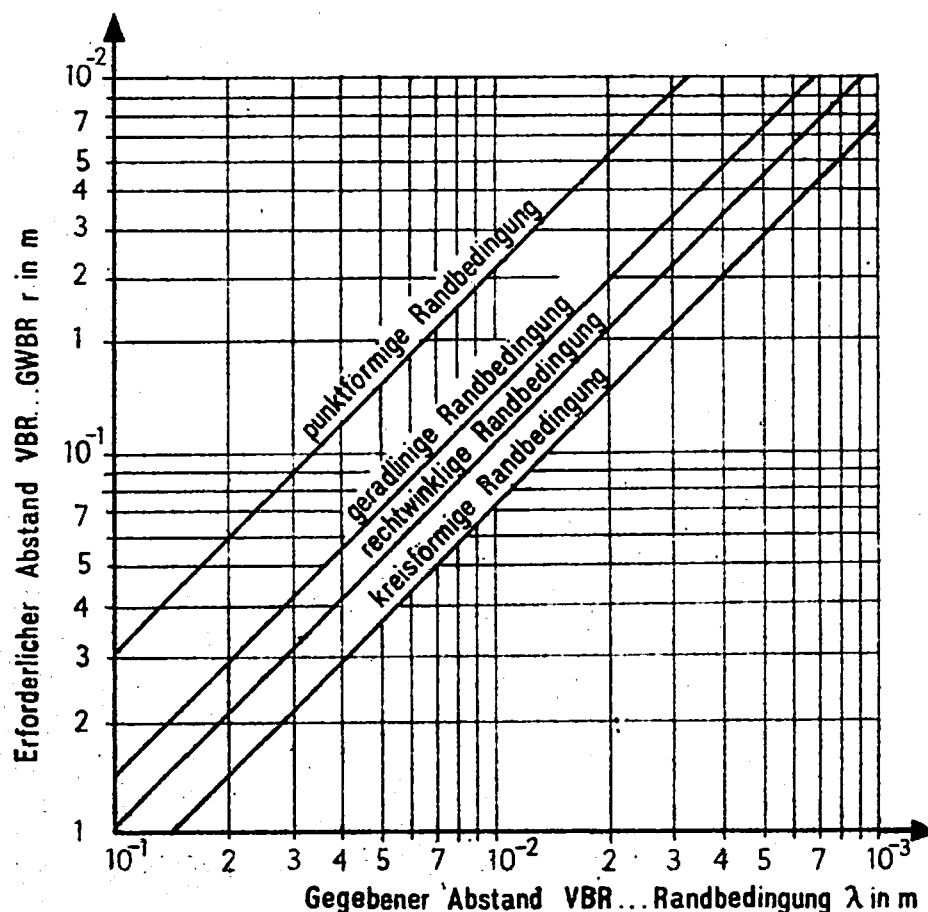


Bild 34

Bestimmung erforderlicher Abstände zwischen VBR und maßgebenden GWR für verschiedene Randbedingungen

und es wurden von SAMSONOW beispielsweise Überhöhungen der T-Werte um 50 % im Vergleich zu Ergebnissen aus Absenkungsmessungen bestimmt. Erhebliche Komplikationen bei der Bewertung, besonders bei vorhandenen Grenzen, entstehen durch stufenweise bzw. kontinuierliche Änderung des Förderstromes sowie bei asynchronem Einschalten der Pumpen bei Gruppenpumpversuchen. Durch Überlagerung des Einflusses der Grenzen und der Pumpstufen ist ggf. eine Interpretation überhaupt nicht mehr möglich.

Bei Pumpversuchen im Übergangsbereich von gespanntem zu ungespanntem Grundwasser führt unter Umständen eine Veränderung des Kurvenendabschnittes mit der Pumpdauer zu veränderlichen allgemeinen Parametern und zu fehlerhaften Interpretationen. Die Untersuchungen von MYSIAK (1972) deuten darauf hin, daß die PV-k-Werte in ungespanntem Grundwasser ca. 30 % über denen in gespanntem Grundwasser liegen. Die graphische Darstellung der Ergebnisse von KRPINSKI (1967) in Bild 35 bestätigen diese Tendenz.

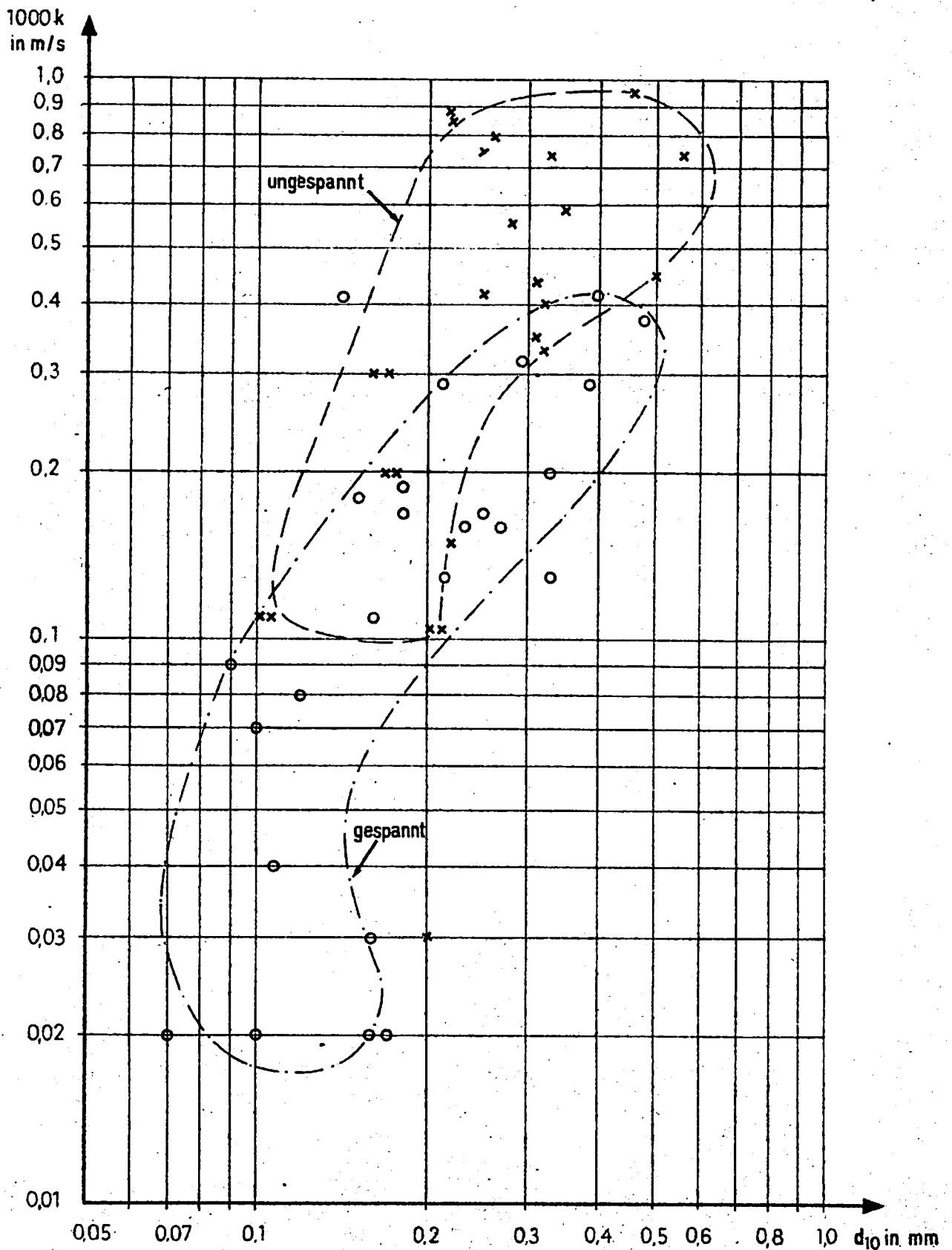


Bild 35

k-Werte aus Pumpversuchsergebnissen nach KEPINSKI (1967)
in sandigen Grundwasserleitern

Es dürfte sich auch hierbei um systematische methodische Fehler handeln, deren Ursachen noch näher zu untersuchen sind.

Die methodischen Fehler bei Pumpversuchen können zu erheblichen k-Wert-Fehlern führen, die nach MARASEK (1966) mit > 50 % den Meßfehlerinfluß weit übertreffen. Da es sich allerdings, wie bereits gesagt, vorwiegend um systematische Fehler handelt, können durch sorgfältige Diagnostizierung und bei Beachtung aller Randbedingungen erhebliche Fehlerreduzierungen erreicht werden. Grundlage hierfür ist die richtige Anwendung des Fachbereichsstandards 23864/02 - /10. ILJIN u. a. ermittelten unter der Voraussetzung einer Verwendung der jeweils richtigen Formel für die richtigen Verhältnisse methodische Fehler von 5 ... 15 %.

6.2.1.3. Gesamtfehler bei Pumpversuchen

Der Maximalfehler $\delta(k)$ bei der analytischen Bestimmung von k-Werten aus Pumpversuchen, resultierend aus Meß- und methodischen Fehlern, wurde von ILJIN u. a. zu etwa 45 % ermittelt. Dabei wurden eine sorgfältige Arbeitsweise und richtige Auswertung vorausgesetzt. Aus analogen Betrachtungen bestimmte KERKIS (1975) im Mittel folgende Fehlergrößen:

Tabelle 12:

Pumpversuchsart	$\delta(k)$
a) Pumpversuche an vollkommenen Einzelbrunnen	15 ... 25 %
b) Schluckversuche (Einpressen oder Eingießen) an vollkommenen Einzelbrunnen	25 ... 50 %
c) Pump- und Einpreßversuche an Versuchsbrunnen- gruppen mit vollkommenen Versuchsbrunnen bei Berechnungen aus Ergebnissen der Niveau- oder Druckabsenkung in GWBR	5 ... 10 %
d) wie c) bei unvollkommenen Versuchsbrunnen	10 ... 15 %

Die größeren Fehler entstehen gewöhnlich bei Untersuchung von Grundwasserleitern mit sehr hoher oder sehr niedriger Durchlässigkeit. Außerdem ist zu beachten, daß eine instationäre PV-Auswertung i. allg. fehleranfälliger ist und die quasistationäre Auswertung nach DUPUIT/THIEM auch heute ihre Bedeutung keinesfalls verloren hat (besonders im Absenkungsbereich > 2 H vom VBR).

Die unter 3.2.1. dargelegten k-Wert-Abweichungen in Brunnennähe sowie in verschiedenen Richtungen und Entfernungen vom Versuchsbrunnen sind in erster Linie systematischer Natur und auf Interpretationsfehler der Versuchsergebnisse zurückzuführen, ggf. aber auch auf größere hydrogeologische Inhomogenitäten (i. allg. haben lokale Inhomogenitäten geringen Einfluß auf die Pumpversuchsergebnisse). Eine Einschränkung der Fehler erfolgt durch Auswertung der Meßergebnisse des mittleren Absenkungsbereiches. Darüber hinaus werden die Einzelergebnisse innerhalb einer Versuchsgruppe durch Mittelbildung einem wahren Wert angenähert.

In Verbindung mit der Repräsentanz der Pumpversuchsergebnisse ist festzustellen, daß diese zwar generell für einen wesentlich größeren Bereich gültig sind als die Labor-k-Werte, innerhalb eines gesamten Untersuchungsgebietes aber ebenfalls Punktcharakteristiken darstellen. Es gelten diesbezüglich die unter 5.2. gemachten Hinweise zur Parameteridentifikation. Gewarnt sei hier nur vor einer bedenkenlosen Mittelwertbildung, die nach HAFNER (1977) vom Charakter der Durchlässigkeitsverteilung abhängt. (Nach SAMSONOW ergeben sich für lognormal verteilte Parameter bei arithmetischer statt geometrischer Mittelbildung Fehler von 50 %, für kompliziertere geologische Verhältnisse > 100 %.)

6.2.2. Hydraulische Bohrlochversuche

Diesem Verfahren wird in der neueren Fachliteratur wachsende Aufmerksamkeit geschenkt. Eine Übersicht wird in Anlage 3, Abschnitt 2.2. gegeben. Ihr besonderer Vorteil besteht in dem geringen Aufwand im Vergleich zu Pumpversuchen, wobei Parameter während des Niederbringens von Bohrungen in jeder beliebigen Tiefe erhalten werden können. Dabei werden aber, im Gegensatz zu den Labormethoden, die Aussagen entsprechend dem natürlichen Gesteinsverband getroffen.

Bisherige Vorbehalte, daß große methodische Fehler infolge stark vereinfachender Annahmen zur Auswertung auftreten können, dürften nach den Untersuchungen von ÇEÇEN (1967), LOHR (1969) und SCHULER (1973) nicht mehr voll gerechtfertigt sein.

Derzeit liegen noch unzureichende Testergebnisse und kaum Fehlereinschätzungen vor. Es wird aber eine ausreichende Genauigkeit eingeschätzt (nach Tabelle 12 dürften die Fehler bis zu 50 % betragen) und eine Anwendung, besonders im Rahmen der Vorerkundung, empfohlen.

6.2.3. Geophysikalische Bohrlochmessungen

An praktikablen und erprobten Verfahren der Geophysik können derzeit für die k-Wert-Bestimmung, trotz verschiedener anderer Entwicklungen, lediglich die Tracer- oder Indikatorbestimmungen angesehen werden. Während das mathematische Modell der Pumpversuche das gesamte System Gestein/Flüssigkeit, also gleichzeitig den Strömungsprozeß und den Zustand des Milieus widerspiegelt (k-Wert), charakterisiert die Indikatormessung in erster Linie nur einen Durchflußprozeß durch einen Abschnitt mit bekannter Geometrie und erlaubt zunächst nur die Bestimmung einer Geschwindigkeit v (Abstandsgeschwindigkeit). Die Ermittlung von k erfolgt dann bei Gültigkeit des DARCY-Gesetzes mit den dafür notwendigen Annahmen.

Obwohl als besonderer Vorteil dieser Verfahren die k-Wert-Bestimmung an einem Grundwasseraufschluß bei natürlichen Gefälleverhältnissen angesehen wird (Einzelbrunnenmethode), werden diese Verfahren zumeist in Verbindung mit Pumpversuchen an Versuchsbrunnengruppen eingesetzt. In diesem Zusammenhang stellen sie eine besonders wertvolle Kontrolle der geohydraulischen Pumpversuchsauswertung dar, zumal, wie gesagt, beide Verfahren auf unterschiedlichen theoretischen Annahmen beruhen.

Als Tracer kommen Farben, Elektrolyte, biologische Markierungen, gelöste Gase sowie radioaktive Isotope in Frage. ILJIN u. a. befürchten bei Farben und Elektrolyten infolge der hohen erforderlichen Konzentrationen Fehler durch Änderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers. Als einzige konkurrenzfähige Methode wird die Eingabe radioaktiver Stoffe angesehen, und die Fehler der Geschwindigkeitsmessungen werden hierfür mit $\delta(v) < 10\%$ ermittelt. Demgegenüber wiesen resistivimetrische Messungen Abweichungen von ca. 50 % zu Pumpversuchsergebnissen auf.

Es erscheint dringend geboten, die Möglichkeiten der geophysikalischen Parameterbestimmung umgehend theoretisch und an praktischen Beispielen näher zu untersuchen und daraus konkrete Anwendungs- und Auswertungsmethodiken abzuleiten.

7. Gegenüberstellung verschiedener Verfahren

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, daß die einzelnen Verfahrenskomplexe zur Bestimmung von k von unterschiedlichen theoretischen Grundlagen, Bezugsgrößen und Annahmen ausgehen und auch für unterschiedliche Feldgrößen repräsentativ sind. Eine direkte Vergleichbarkeit ist also kompliziert und fragwürdig und dies um so mehr, als ein wahrer Wert als Vergleichsmaßstab unbekannt ist.

Für theoretische Gegenüberstellungen, aber auch in der routinemäßigen Erkundungspraxis, wird davon ausgegangen, daß Pumpversuche die besten, d. h. die die natürlichen Verhältnisse am günstigsten repräsentierenden k -Werte ergeben. Obwohl diese Feststellung, wie weiter vorn gezeigt wurde, nicht unumschränkt bzw. nur bei bester Untersuchungs- und Auswertungsqualität zutrifft, besteht derzeit keine bessere Möglichkeit, als diese Pumpversuchsergebnisse als richtige und damit als Bezugswerte anzunehmen.

Für hydrogeologische Erkundungsarbeiten haben sich in der DDR folgende Verfahren der k -Wert-Bestimmung eingebürgert:

- Pumpversuche an Einzelbrunnen und Versuchsbrunnengruppen mit vorwiegender instationärer Auswertung des zeitlichen Absenkungsverlaufes und des räumlichen Absenkungstriechers (TGL 23864);
- Bestimmung aus Kornverteilungskurven nach BEYER und ZIESCHANG.

Gelegentlich werden zusätzlich Permeametermessungen oder Indikatormessungen durchgeführt.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt weitgehend intuitiv und auf der Grundlage von Erfahrungsrichtwerten, wobei generell den Pumpversuchsergebnissen die dominierende Rolle zukommt.

Obwohl Sieb-k-Werte in großer Anzahl berechnet werden, ist es erwiesen, daß ihnen nur sekundäre Bedeutung beigemessen wird. Eine direkte Verwendung erfolgt zumeist gar nicht, oder nur dann, wenn keine Pumpversuchsergebnisse vorhanden bzw. die Pumpversuche nicht auswertbar sind. Ggf. werden die Siebwerte als Vergleichswerte und zur Stützung der Pumpversuchswerte betrachtet und geben bei auftretenden großen Diskrepanzen Hinweise zur Fehlersuche. Als Begründung, daß trotzdem nach wie vor von fast allen Bohrungen Sieb-k-Werte bestimmt werden, wird festgestellt, daß Kornverteilungskurven zur genauen Gesteinsansprache und für spätere Brunnenbemessungen sowieso unerlässlich sind und die k-Werte mit unbedeutendem Mehraufwand praktisch mit abfallen. Diese Aussage scheint akzeptabel, und man sollte in Erwägung ziehen, z. B. in niederen Erkundungsstadien (S, VE), in Verbindung mit entsprechenden objekttypischen "Eichpumpversuchen", eine generelle Einsparung kostenintensiver Pumpversuche vorzunehmen. Eine grundlegende Verbesserung der Probenahme ist aus weiter vorn gemachten Gründen dazu erforderlich.

Wie aus den theoretischen Ableitungen ersichtlich, gehen die Formeln zur k-Wert-Berechnung aus Siebanalysen von einer Grundgleichung aus, und es ist zu erwarten, daß sich die Ergebnisse analog verhalten bzw. sich nur durch einen Faktor unterscheiden. Aus der empirischen Auswertung in Bild 36 ist eindeutig erkennbar, daß dies auch für die Werte nach BEYER und ZIESCHANG zutrifft, wobei letzterer generell um 20 % höher liegt:

$$k_{\text{ZIESCHANG}} = 1,2 k_{\text{BEYER}}$$

Eine gleichzeitige Bestimmung nach beiden Verfahren dürfte damit überflüssig sein.

Hinsichtlich des Verhältnisses der Sieb- zu PV-k-Werten ist man sich in der Fachliteratur nicht ganz einig. Allerdings betrachten es die Mehrzahl der Verfasser als erwiesen, daß Siebwerte generell größer sind, d. h. eine Reduzierung erfolgen muß. Aus Vergleichen zwischen PV-Ergebnissen und gewogenen Mittelwerten aus Siebanalysen für die entsprechenden Bohrungen (Filterbereich) ergaben sich folgende Zusammenhänge:

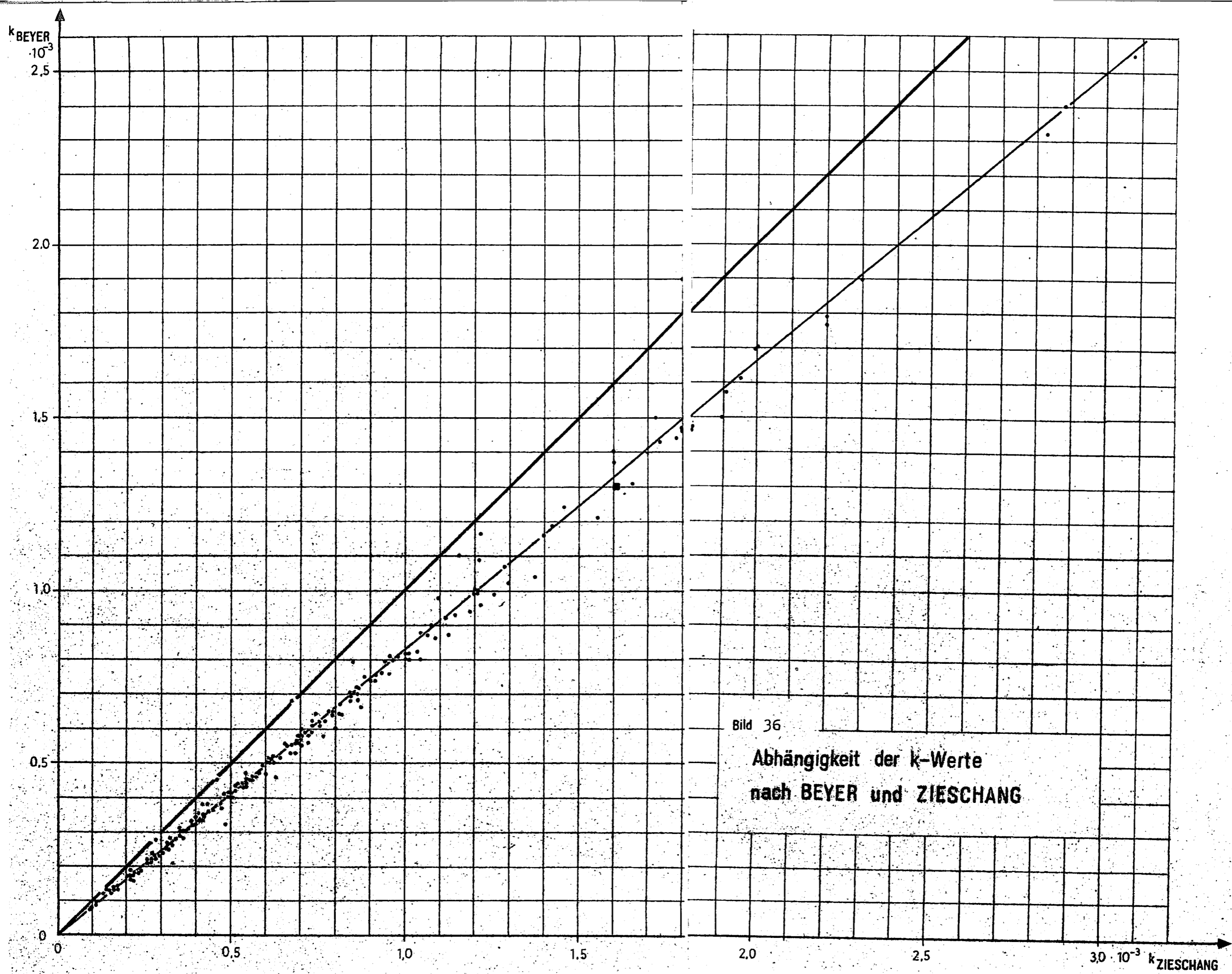


Bild 36

Abhängigkeit der k-Werte
nach BEYER und ZIESCHANG

nach CASTANY

für holozäne Ablagerungen

$$k_{PV} \approx 0,2 k_{Sieb}$$

nach MANHENKE u. a.

. für pleistozänen Kiessand und Grobkies

k_{Sieb} bis zu 100 % zu hoch, d. h.

$$k_{PV} \approx 0,5 k_{Sieb}$$

. für tertiäre Sande

gute Übereinstimmung

nach KOZERSKY

. für Sande im Bereich $k_{Sieb} = (10^{-5} \dots 10^{-4})$ m/s

$$k_{PV} \approx 0,6 k_{Sieb}$$

. für gröberes Gestein mit $0,1 \cdot 10^{-3}$ k_{Sieb} $1 \cdot 10^{-3}$ m/s

$$k_{PV} \approx (0,2 \dots 0,4) k_{Sieb}$$

nach MYSIAK

. für ungespanntes Grundwasser

$$k_{PV} \approx 0,8 k_{Sieb}$$

. für gespanntes Grundwasser

$$k_{PV} \approx 0,6 k_{Sieb}$$

nach BEYER (aus Vergleichswerten) für Elbeschotter

$$k_{PV} \approx (0,7 \dots 1,1) k_{Sieb}$$

Als Hauptursache für diese Erhöhung der Siebanalysenwerte werden Auswaschungen des Feingutes infolge Bohrprozeß und fehlerhafter Probenahme angesehen.

Es existieren allerdings auch einige Autoren, die in Einzelobjekten größere PV-Werte ermittelt haben, z. B.

nach KRÄTZSCHMAR für sandig-kiesige Flußschotter

$$k_{PV} \approx 1,6 k_{Sieb}$$

nach KLUGE/HAGENDORF für Feinsande

$$k_{PV} \approx 1,7 k_{Sieb}$$

nach LANGHUTSCH für Talsande (MS + GS)

$$k_{PV} \approx 2 k_{Sieb}$$

Auch diese Ergebnisse lassen sich letztlich auf fehlerhafte Bohrungen und Probenahme zurückführen:

- Nachfall im Bohrloch
- Einspülung von Feingut, z. B. hangender Schichten, in darunterliegende Wasserleiter durch Bohrprozeß
- Nichtbeachtung sehr grobklastischer Horizonte bei Probenahme und Siebanalyse
- unsachgemäße Bohrgutmischung
- zufallsabhängige punktförmige Entnahme des Probegutes.

Empirische Vergleichsuntersuchungen des Verfassers mit über 300 Pumpversuchen im Lockergestein ergaben bei Nichtbeachtung der petrophysikalischen Gesteinszusammensetzung zunächst eine völlig chaotische Abhängigkeit zwischen k_{pv} und k_{Sieb} , d. h., die Werte streuten in großer Breite sowohl nach unten als auch nach oben. Eindeutigere Aussagen sind unter Bezug auf gewisse Gesteinsklassen möglich. Für Grobsande und Feinkiese liegen gemäß Bild 37 die Werte nach BEYER generell über den Pumpversuchswerten. Analoges trifft für Mittelsande bei stationärer Pumpversuchsauswertung zu (Bild 38). Bei nichtstationärer Auswertung der Pumpversuche ist allerdings im Mittelsandbereich eine wesentlich größere Streuung der Werte zu verzeichnen, wobei eine erhebliche Verschiebung nach größeren Pumpversuchswerten nicht zu übersehen ist (Bild 39). Hier dürfte wohl auch die größere Fehlerempfindlichkeit der nichtstationären Verfahren eine Rolle spielen.

Insgesamt kann man feststellen, daß die Sieb-k-Werte i. allg. zu groß sind und sich annähernd eine lineare Abhängigkeit zwischen k_{Sieb} und k_{pv} ergibt. Jedoch ist die Korrelation zwischen beiden so gering, daß sich allgemeingültige Aussagen zur sicheren Bestimmung einer Größe aus der anderen in Form einer Regressionsgleichung kaum ableiten lassen. Es macht sich also, wie bereits vermerkt, eine objektbezogene Richtung der k-Werte erforderlich.

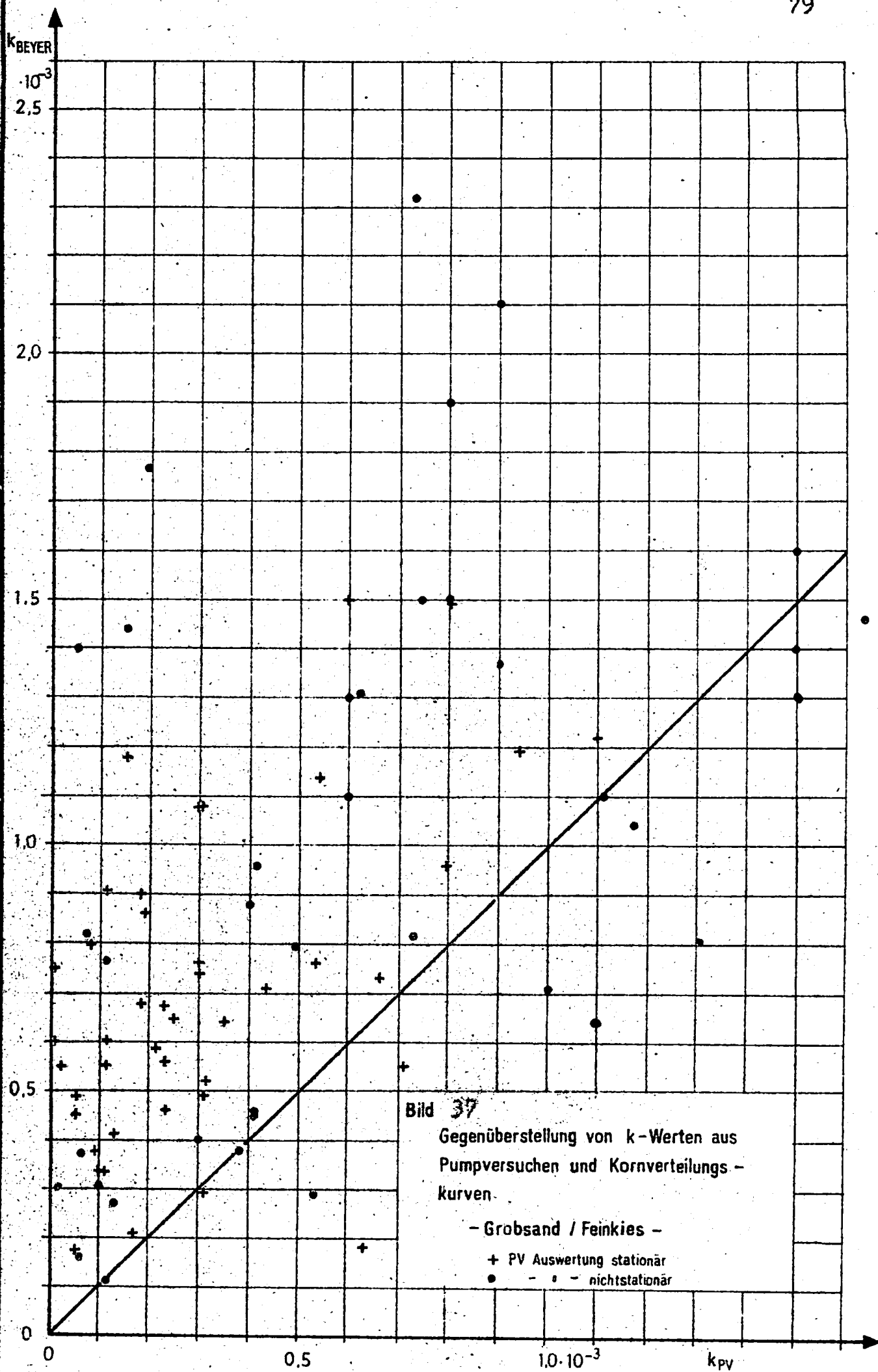


Bild 37

Gegenüberstellung von k -Werten aus
Pumpversuchen und Kornverteilungs-
kurven.

- Grobsand / Feinkies -

+ PV Auswertung stationär

• - - - nichtstationär

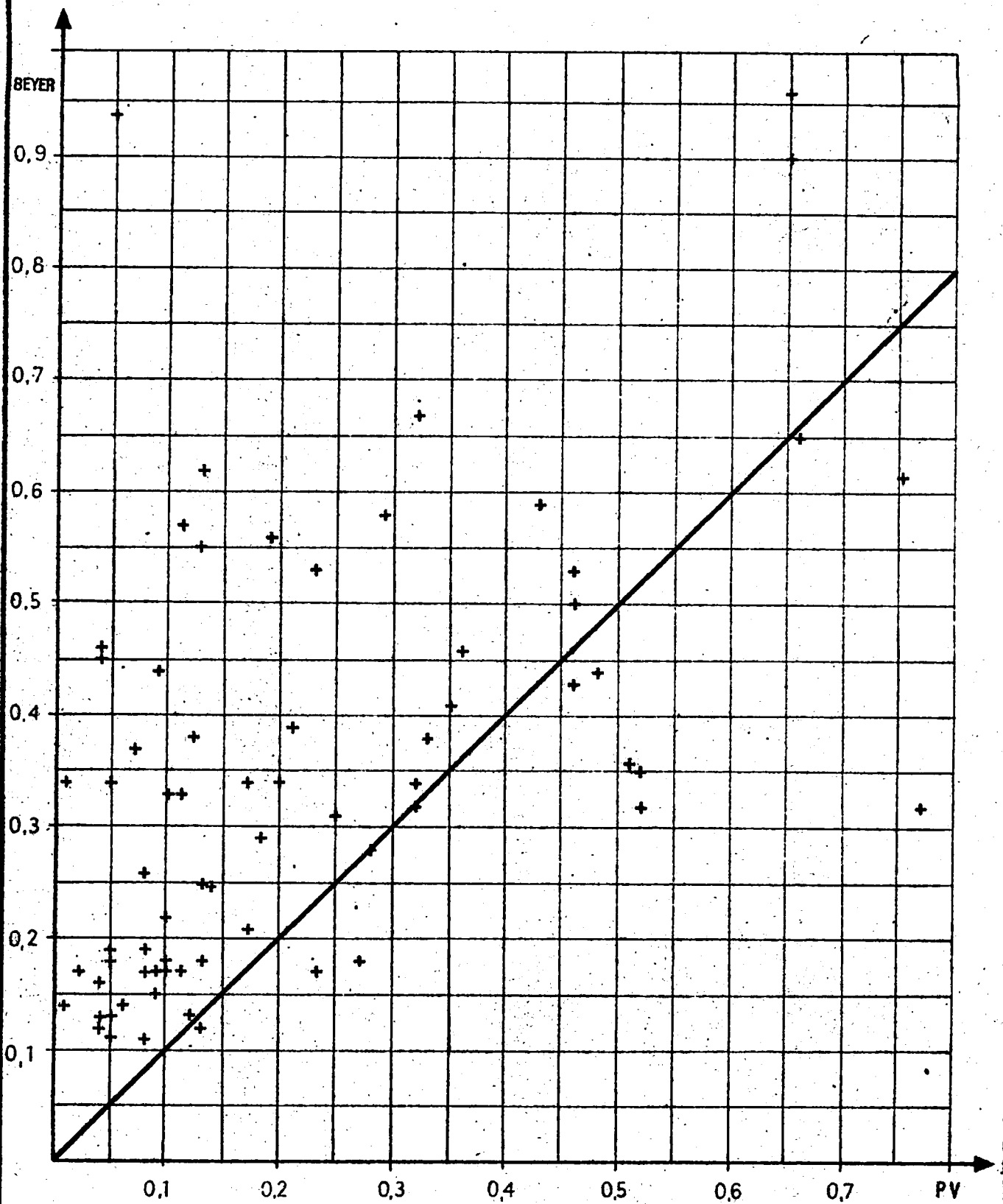


Bild 38

Gegenüberstellung von k -Werten aus Pumpversuchen (stationäre Auswertung) und Kornverteilungskurven

- Mittelsand -

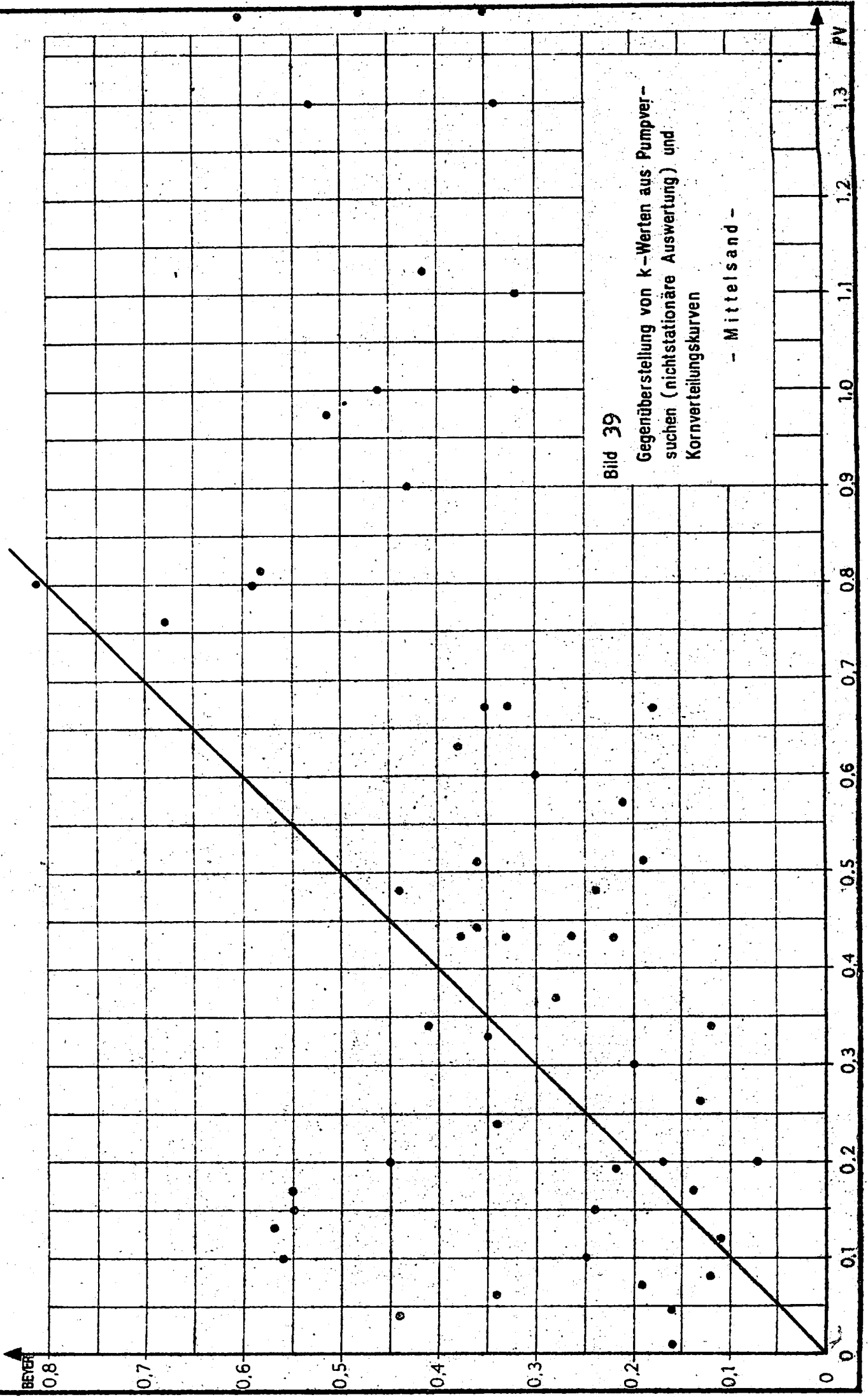


Bild 39

Gegenüberstellung von k-Werten aus Pumpver-
suchen (nichtstationäre Auswertung) und
Kornverteilungskurven

- Mittelsand -

Die k -Werte aus Laboruntersuchungen mittels Permeameter sind i. allg. kleiner als PV- k -Werte und damit natürlich auch kleiner als Werte aus Siebanalysen. Wie aus Bild 40 erkennbar, deutet sich zwischen k_{Sieb} und k_{Labor} sogar eine recht gute korrelative Beziehung an. Die Unterschiede sind in hohem Maße auf methodische Fehler zurückzuführen, die ihrerseits besonders für die einzelnen Untersuchungslabors charakteristisch sein dürften (keine Standardverfahren). Im Vergleich mit Pampversuchen werden folgende Abhängigkeiten zu gewogenen Labormittelwerten angegeben:

- nach ILJIN u. a.

$$k_{\text{PV}} \approx (1,4 \dots 1,7) k_{\text{Labor}}$$

- nach KLUGE

$$k_{\text{PV}} \text{ bis zu } 250 k_{\text{Labor}}$$

- nach CASTANY

$$k_{\text{PV}} \text{ bis zu } 100 k_{\text{Labor}}$$

- nach SEILER

$$k_{\text{PV}} \approx 3 k_{\text{Labor}}$$

Auch hier lassen sich nach ILJIN u. a. kaum korrelative Zusammenhänge zur direkten Umrechnung bzw. Korrektur der Ergebnisse ableiten.

Eine vergleichsweise Bewertung anderer Verfahren muß derzeit mangels genügender Unterlagen entfallen.

Gewisse Hinweise ergeben sich aus Kapitel 6. und Anlage 3.

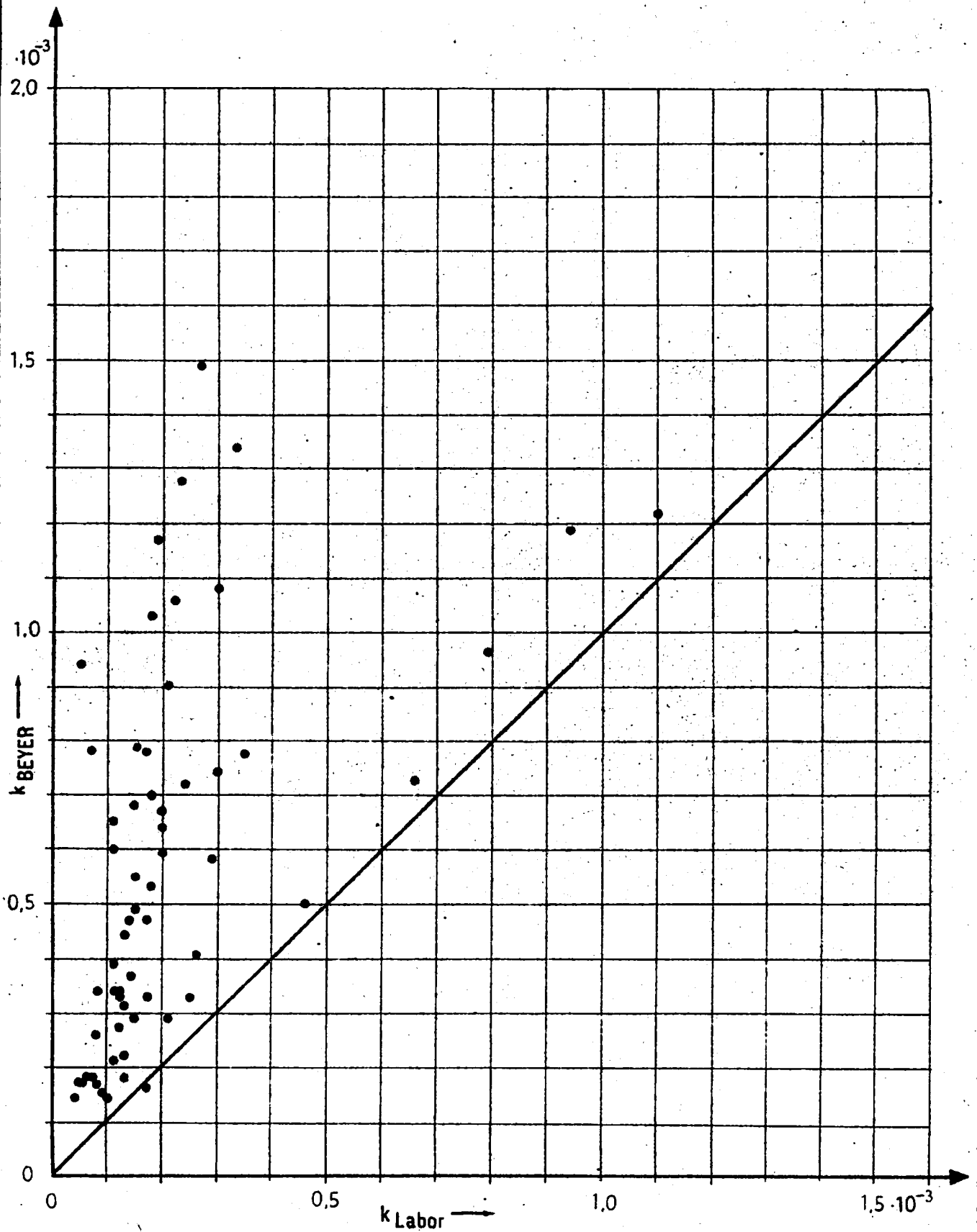


Bild 40

Gegenüberstellung von k-Werten aus Laborversuchen und Kornverteilungskurven

- Pleistozäne Sande und Kiese -

8. Erforderliche Genauigkeiten der k-Werte

In unmittelbarem Zusammenhang mit der Problematik der möglichen Genauigkeit des k-Wertes bzw. seiner Bestimmungsverfahren tritt die Frage auf, wie genau dieser Parameter eigentlich benötigt wird und welche Fehlersehranken bei dessen Ermittlung eingehalten werden müssen. In der Fachliteratur existieren hierzu bisher kaum Angaben. In der Erkundungspraxis wird aus der Fülle der Informationen ein maßgebender Parameter gewählt, ohne daß man sich Gedanken über die damit erreichte Genauigkeit macht. k-Werte haben also i. allg. keinen Sicherheitsgrad und keine Intervallgrenzen.

Generell ist die erforderliche Genauigkeit von der konkreten Zielstellung, d. h. vom Verwendungszweck der Parameter, abhängig, und es sind diesbezüglich eine Reihe von Gesichtspunkten zu beachten:

- a) In vielen praktischen Fällen ist eine allgemeine Bewertung der Durchlässigkeitsverhältnisse notwendig. Z. B. wenn es um die Unterscheidung von höffigen und weniger höffigen Gebieten, von Grundwasserleitern mit größerer oder geringerer Ergiebigkeit, von Grundwasserleitern und Grundwasserstauern geht, aber auch bei Problemen der hydrogeologischen Kartierung und der Standortwahl von Wasserfassungen. Bei derartigen Aufgabenstellungen dient der k-Wert in erster Linie als Maßstab bzw. Normativwert zur vorwiegend qualitativen Einschätzung der hydrogeologischen Situation. Aber auch für grobe Berechnungen, z. B. im Rahmen von Prognosen, ist in vielen Fällen die Bestimmung der Größenordnung des k-Wertes ausreichend. Die Anforderungen an die Genauigkeit sind also relativ gering.

Dient demgegenüber k als Ausgangswert für geohydraulische Vor-
ausberechnungen konkreter Strömungsfelder, beispielsweise in Verbindung mit Grundwasservorratsnachweisen, macht sich natürlich eine größere Genauigkeit erforderlich.

- b) Nur selten wird in der Grundwassererkundung eine Punktdurch-
lässigkeit benötigt, vielmehr machen sich i. allg. gebiets-
spezifische Repräsentativwerte erforderlich. Daraus ergibt

sich die Notwendigkeit, nicht nur eine hohe Genauigkeit der Einzelwerte anzustreben, sondern auch eine genügende Anzahl (Aufwand) an Informationen bereitzustellen, um eine richtige Parameteridentifikation (statistisch, modelltechnisch) realisieren zu können.

- c) Bei Betrachtung von Genauigkeitsanforderungen und Aufwandsproblemen muß man sich darüber klar werden, ob die als Stichproben anzusehenden Einzelinformationen zur Bildung von repräsentativen Mittelwerten für die jeweils betrachteten Feldabschnitte dienen sollen (globales Problem), oder ob eine Vorhersage wahrscheinlicher Werte an bestimmten Stellen des Untersuchungsgebietes und damit verbundene Interpolations- und Extrapolationsprobleme (lokales Problem) von Interesse ist. Untersuchungen von BAMBERG/GARLING (1976) zeigen, daß für lokale Aussagen eine erheblich größere Informationsdichte erforderlich ist bzw. bei gleichem Aufwand eine geringere Genauigkeit erreicht werden kann.
- d) Im Gegensatz zu festen mineralischen Rohstoffen besteht für Grundwasser die Möglichkeit, die gesamte Lagerstätte von einem Punkt bzw. einer Linie aus zu erschließen (Grundwasserfassung). Daraus resultiert die Tatsache, daß unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen innerhalb eines Untersuchungsgebietes gestellt werden können. So ist im vorgesehenen Fassungs-bereich in Verbindung mit Anordnung, Anzahl und Ausbau der Brunnen eine wesentlich größere Genauigkeit notwendig als in brunnenferneren Einzugsgebieten. Nach Untersuchungen von EHRHARDT (1978/79) ist der Einfluß und die Erfassung von Inhomogenitäten im fassungsnahen Raum für eine Vorratsberechnung besonders bedeutungsvoll. Analoge Aussagen treffen z. B. auch bei ingenieurgeologischen Erkundungen von Stauanlagen usw. zu.
- e) Das Erreichen einer hohen Effektivität der hydrogeologischen Erkundung bei möglichst geringem Risiko erfordert u. a. eine richtige Organisation des Erkundungsablaufes. Aus diesem Grunde werden Erkundungen in verschiedenen Stappen (Suche, Vorerkundung, Detailerkundung) gefordert, die jeweils spezifische Aufgabenstellungen haben und sich infolge des zunehmenden

Kenntnisstandes hinsichtlich ihrer Genauigkeit unterscheiden. So beziehen sich die Suche und Vorerkundung primär auf eine Informationsgewinnung zur gesamten Grundwasserlagerstätte (Einzugsgebiet), und in der Detailerkundung gilt es dann besonders, spezielle Fassungsbedingungen und -standarte zu untersuchen (vgl. d)).

- f) Wesentliche Bedeutung für die erforderliche Genauigkeit der k-Werte haben das vorgesehene Berechnungsverfahren zur Lösung des Strömungsproblems sowie die geforderte Vorratsgenauigkeit.

Hinweise dazu enthält Tabelle 13.

Spezielle Aussagen hierzu ergeben sich im Zusammenhang mit Untersuchungen zum Einfluß der Filtrationsparameter, der Randbedingungen und der Schematisierung der natürlichen Verhältnisse auf die Genauigkeit der ermittelten Vorräte, die Gegenstand weiterer Arbeiten sind. Es ist allerdings zu erwarten, daß besonders für modelltechnische und numerische Berechnungen der Einfluß fehlerbehafteter k-Werte auf den Grundwasservorrat geringer sein wird als ungenaue Annahmen hinsichtlich der Randbedingungen.

- g) Nicht selten reicht für die geforderte Aussage die Kenntnis garantierter Minimal- oder Maximalwerte (Grenzparameter) aus, insbesondere dann, wenn man "auf der sicheren Seite" bleiben will oder muß. Für Wasserhaltungen und Grundwasserabsenkungen z. B. orientiert man vorzugsweise auf maximale k-Werte, um die Absenkung in jedem Fall zu garantieren. Für Wasserversorgungszwecke wäre andererseits unter dem Aspekt einer allzeit ungefährdeten Versorgung der Bevölkerung eine Verwendung von k-Werten denkbar, die sich der unteren Grenze nähern. Für eine Gewinnung derartiger Grenzparameter dürften geringere Genauigkeiten i. allg. ausreichend sein.

- h) Entsprechend den Hinweisen zur Filtrationsinhomogenität (5.2.) ist festzustellen, daß mit wachsender Größe des Untersuchungsgebietes der Einfluß lokaler Inhomogenitäten immer geringer wird, zugunsten großräuiger (gesetzmäßiger) Trends. Aus dieser Tatsache resultieren ebenfalls Rückschlüsse auf die erforderliche Parametergenauigkeit.

Tabelle 13: Erforderliche Aussagen zur Lösung von Strömungsproblemen

Problemstellung	zu klärende Merkmale und Sachverhalte	analytische Berechnung	Papiermodelle	Netzwerke	numerische Berechnung
<p>Geometrie und Lagerungsverhältnisse GW-Leiter</p>	<ul style="list-style-type: none"> • GW/GWL-Mächtigkeit • geologische Grenzen (vertikal/horizontal) • Vorhandensein von Anomalien, Rinnen usw. 	<p>starke Simplifikation der natürlichen Verhältnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • mittlere Mächtigkeit (M) für gespanntes GW (Repräsentativwert für gesamten Fassungsbereich bzw. Strömungsfeld) • fiktive horizontale GWL-Sohle bei ungespanntem GW • starke Schematisierung der Berandung 	<p>teilweise Simplifikation der natürlichen Verhältnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ein mittlerer M-Wert für gespanntes GW (Repräsentativwert für gesamten Fassungsbereich) • fiktive horizontale GWL-Sohle für ungespanntes GW • Berandung beliebig 	<ul style="list-style-type: none"> • örtlich wechselnde M-Werte möglich • Angaben über Größe diskreter Elemente, für die diese Werte repräsentativ sind 	<p>geringe Simplifikationen der natürlichen Verhältnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • örtlich wechselnde Besonderheiten sind zu beachten • Verteilung und Anzahl der Stützstellen
<p>Petrophysikalische Beschaffenheit</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kornverteilung • hydrogeologische Parameter: Brunneneinheitsergiebigkeit (E) Durchlässigkeitsbeiwert (k) Transmissibilität (T) Speicherkoefizient (S) Speisungsfaktor (B) 	<ul style="list-style-type: none"> • ein mittl. k-Wert (Repräsentativwert für gesamten Fassungsbereich bzw. Strömungsfeld) • örtl. und zeitl. Mittelwerte für S und B für gesamtes von Fassung beeinflusstes Gebiet • idealisierte Schichtung (Mittelwerte) 	<p>ein mittl. k-Wert (Repräsentativwert für gesamten Fassungsbereich)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • örtlicher Wechsel von k und T zulässig • Angaben über Größe diskreter Elemente 	<ul style="list-style-type: none"> • örtlich wechselnde Besonderheiten werden beachtet • Verteilung und Anzahl der Stützstellen

- i) Es ist zu beachten, daß an hydrogeologische Erkundungsbohrungen unterschiedliche qualitative Anforderungen gestellt werden (z. B. Versuchsbrunnen, GWBR) und andererseits verschiedene Bohrverfahren unterschiedliche Genauigkeiten hinsichtlich Probenahme, Tests usw. und damit ggf. auch unterschiedliche Einsatzbedingungen aufweisen.

Für die Einschätzung bzw. Festlegung der erforderlichen Genauigkeit muß man die genannten Gesichtspunkte, die z. T. enge Zusammenhänge aufweisen, von Fall zu Fall im Komplex betrachten. Allerdings ist es recht schwierig, daraus quantitative, zulässige Fehlerschranken abzuleiten.

In Verbindung mit statistischen Analysen an ca. 100 abgeschlossenen Erkundungsobjekten im Lockergestein führten BAMBERG/GARLING (1976) eine Fehleranalyse durch, und es wurden die in Tabelle 14 angegebenen mittleren Genauigkeiten in Abhängigkeit vom Bohraufwand bestimmt.

Tabelle 14: Genauigkeiten bisheriger Erkundungen

		Vorerkundung		Detailerkundung	
		Geometrie (H, BT)	Parameter (k, T, E)	Geometrie (H, BT)	Parameter (k, T, E)
Urstrom- täler	globales Problem	10 %	20 %	5 %	10 %
	lokales Problem	-	-	20 %	40 %
Hoch- flächen (Grund- moränen)	globales Problem	(15 %)	(30 %)	(10 %)	(20 %)

Diese Angaben betreffen die Repräsentanzfehler für das Untersuchungsgebiet und berücksichtigen technische Fehler der Einzelmessungen nicht. Sie lassen erkennen, daß die k-Werte infolge ihrer größeren Veränderlichkeit mit größeren Fehlern behaftet sind, resp. eine geringere Repräsentanz aufweisen, als Aussagen zur Geometrie des Grundwasserleiters.

Analoge bzw. erweiterte Anforderungen stellt KERKIS (1975) bei der Formulierung zulässiger Fehler der Hauptfiltrationsparameter gemäß Tabelle 15.

Tabelle 15: Zulässige Fehler der Hauptfiltrationsparameter

Aufgaben und Untersuchungsobjekte	Untersuchungsstadium	
	Vorerkundung	Detailerkundung
Prognose des Wasserzuflusses im Bergbau und in Baugruben	30 - 50 %	15 - 25 %
Einschätzung der Sicker- (Filtrations-)verluste an der Sohle hydrotechnischer Bauwerke, aus Kanälen und Speicherbecken	30 - 50 %	15 - 25 %
Einschätzung gewinnbarer Grundwasservorräte	20 - 30 %	10 - 15 %
Prognose des Grundwasserregimes in Be- und Entwässerungsgebieten	50 - 75 %	25 - 35 %

KERKIS sieht diese Fehlerprozentage als unterste Grenze an und vermerkt, daß in einigen Fällen größere Abweichungen zugelassen werden müssen.

Die Angaben der Tabellen 14 und 15 geben einen guten Überblick über die erreichbare und notwendige Größenordnung der Genauigkeit der k-Werte. Sie bieten, in Verbindung mit einer Reihe sich aus den vorangegangenen Kapiteln ergebender Maßnahmen zur Reduzierung methodischer und Meßfehler sowie zur Aufwandsoptimierung, eine verwendbare Grundlage für eine Qualifizierung der erkundungsmethodischen Richtlinien.

9. Zusammenfassung

Innerhalb der hydrogeologischen Informationsgewinnung stellt der Durchlässigkeitsbeiwert einen der wichtigsten Parameter sowohl hinsichtlich seiner Weiterverwendung für die Berechnung von Strömungsproblemen als auch bezüglich des zu seiner Ermittlung erforderlichen Aufwandes dar. Mit dem vorliegenden Bericht wird

deshalb ein wesentliches Teilthema zu der geplanten F/E-Arbeit über die Problematik der Genauigkeit des Grundwasservorratsnachweises realisiert.

Nach einer Beschreibung der wichtigsten Eigenschaften, Annahmen und Abhängigkeiten des k-Wertes erfolgt eine Untersuchung der auftretenden Fehler sowie eine Analyse und Bewertung der wichtigsten Bestimmungsverfahren.

Für eine weitere Themenbearbeitung sowie für eine Verbesserung der Informationsgewinnung (ggf. Erarbeitung einer Methodik) lassen sich einige Schwerpunkte zusammenfassen:

- a) Die grundlegende Entwicklung und Verbesserung der Pumpversuchsmethodik hat die Benutzung der billigeren Siebanalysenverfahren kaum eingeschränkt. Unter Beachtung der geringeren Aussagequalität und bei Durchführung gewisser objektbezogener Eichungen sollte das Verfahren nach BRER auch künftig beibehalten werden. Der Einsatz des jeweils optimalen Verfahrens bzw. deren Kombination sind durch entsprechende Empfehlungen auf der Grundlage des Erkundungsstadiums und der speziellen Aufgabenstellungen zu regeln.
- b) Es sollten bisher ungebräuchliche Verfahren der k-Wert-Bestimmung, die eine Kostenminderung sowie einen Einsatz z. B. bei Spülbohrverfahren erlauben, untersucht und getestet werden. Insbesondere geht es um die Bohrlochversuche sowie einige Arten von geophysikalischen Verfahren.
- c) Die Genauigkeit der Punktdurchlässigkeit ist durch methodische Maßnahmen zu verbessern. Dies gilt besonders in Bezug auf
 - Messungen des Förderstromes,
 - Genauigkeit der Probenahme und Probenintervalle,
 - sorgfältige Diagnostizierung der Pumpversuchsergebnisse.
- d) In Abhängigkeit von vorgesehenen Identifikationsverfahren ist der Ermittlung von Repräsentativwerten größere Bedeutung beizumessen. Diesbezüglich wären Anwendungsrichtlinien unter Beachtung des erforderlichen Aufwandes zu erarbeiten.

e) Problematisch ist nach wie vor die Einschätzung der Durchlässigkeit sehr schlechter Grundwasserleiter bzw. Grundwasserstauer.

Diesbezüglich wären spezielle Untersuchungen empfehlenswert.