

Detlef Appel & Walter Habler

**Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung**

**Phase 1:**

**Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit**

---

Datum: 26.2.2001

---

BfS-Bestellnummer: 8377-9-6

---

Dipl.-Geol. Dr. Detlef Appel

PanGeo - Geowissenschaftliches Büro  
Ibykusweg 23  
30629 Hannover  
Telefon: 0511 - 95 86 710  
Telefax: 0511 - 95 86 711  
email: [appel-pangeo@t-online.de](mailto:appel-pangeo@t-online.de)

Dipl.-Geol. Dr. Walter Habler

Dr. W. Habler - Geoservice  
Kaiser-Wilhelm-Straße 11  
31061 Alfeld  
Telefon: 05181 - 82 92 12  
Telefax: 05181 - 82 92 14  
e-mail: [walter.habler@t-online.de](mailto:walter.habler@t-online.de)

D. Appel & W. Habler

**Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung  
für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung**

**Phase 1:**

**Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit**

**Inhalt**

Seite

Zusammenfassung .....	1
1. Aufgabenstellung und Gliederung des Berichtes.....	5
2. Grundlagen der Grundwasserbewegung .....	7
2.1 Grundwasserbewegung in klüftigem Gestein .....	7
2.2 Die Durchlässigkeit und das äquivalente poröse Medium.....	7
2.3 Durchlässigkeit und Fließgeschwindigkeit in Klüften.....	9
2.4 Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen .....	11
2.4.1 Porosität.....	11
2.4.2 Speichervermögen .....	11
2.5 Tiefenzunahme .....	13
3. Methodendarstellung und –bewertung.....	15
3.1 Einflussvolumen.....	15
3.2 Reproduzierbarkeit von Testdaten, Erfahrungsstand und Aufwand einzelner Methoden .....	17
3.3 Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Verfahren.....	18
3.4 Auswerteverfahren hydraulischer Versuche .....	21
3.4.1 Analytische Lösungen .....	21
3.4.2 Numerische Lösungen.....	22
3.5 In situ Verfahren für hydrogeologische Fragestellungen.....	22
3.5.1 Hydraulische Methoden.....	22
3.5.1.1 Langzeitpumpversuch (Aquifertest) und Injektionsversuch.....	22
3.5.1.2 Packertests .....	24
3.5.1.3 Weitere hydraulische Bohrlochversuche .....	33
3.5.1.4 Ventilationsversuch.....	36

---

	Seite
3.5.2	Tracer-Methoden .....36
3.5.2.1	Elektrolytischer Tracer (NaCl, MgCl <sub>2</sub> ) .....36
3.5.2.2	Sporendrift, Mikropartikel .....38
3.5.2.3	Aktivierungsanalytisches Tracerverfahren .....38
3.5.2.4	Einbohrlochverdünnungsmethode mit radioaktiven Tracern .....39
3.5.2.5	Einbohrlochverdünnungsmethode mit Uranin als Tracer .....40
3.5.3	Bohrlochlogging-Methoden.....40
3.5.3.1	Mechanische Methoden.....40
3.5.3.2	Thermische Methoden .....41
3.5.3.3	Radioaktive Methoden .....43
3.5.3.4	Elektrische Verfahren.....45
3.5.3.5	Akustische Verfahren .....47
3.5.3.6	Optische Verfahren .....48
3.6	Zusammenfassende Verfahrensbeurteilung.....49
4.	Zusammenstellung der Datensätze .....55
4.1	Datenherkunft .....55
4.2.	Systematik der Datenzusammenstellung .....58
5.	Beurteilung der Datensätze für die Kriterienentwicklung .....60
5.1	Faktoren mit Bedeutung für die Datenqualität .....60
5.2	Formale Beurteilung.....61
5.3	Inhaltliche Beurteilung.....62
5.3.1	Gebirgsdurchlässigkeit .....62
5.3.1.1	Gesteinstypübergreifende Auswertung.....62
5.3.1.2	Ton/Tonstein .....66
5.3.1.3	Mergelstein.....66
5.3.1.4	Gneis.....68
5.3.1.5	Granit .....68
5.3.1.6	Tuffit .....70
5.3.2	Der Speicherkoeffizient .....70
5.3.3	Die Grundwasserfließgeschwindigkeit .....77
5.4	Zusammenfassende Bewertung .....78
6.	Weiteres Vorgehen.....80
7.	Quellen .....81

---

	Seite	
<b>Verzeichnis der Tabellen</b>		
Tabelle 3-1	Kennwerte verschiedener hydraulischer Methoden	52-54
Tabelle 4-1	Kurzcharakterisierung der erfassten Datensätze.	57
Tabelle 5-1	Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen.	63
Tabelle 5-2	Gebirgsdurchlässigkeit von Ton/Tonstein in Tiefen kleiner als 200 m unter Geländeoberfläche.	67
Tabelle 5-3	Gebirgsdurchlässigkeit von Ton und Tonstein in Tiefen über 200 m unter Geländeoberfläche	67
Tabelle 5-4	Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein	67
Tabelle 5-5	Gebirgsdurchlässigkeit von Gneis	68
Tabelle 5-6	Gebirgsdurchlässigkeit von Granit nach Standorten	69
Tabelle 5-7	Gebirgsdurchlässigkeit von Granit nach Tiefenklassen	69
Tabelle 5-8	Gebirgsdurchlässigkeit von Tuffit	70
Tabelle 5-9	Spezifische Speicherkoeffizienten bei einzelnen Gesteinstypen in unterschiedlichen Tiefenbereichen	76

**Verzeichnis der Abbildungen**

Abb. 3-1	Fluid-Logging und Lugeon-Test-Resultate: Vergleich der Transmissivitätswerte	19
Abb. 3-2	Versuchsaufbau bei Slug-Tests	28
Abb. 3-3	Druckverlauf bei einem Drill-Stem-Test	31
Abb. 3-4	Funktionsweise des Ventilationstestverfahrens	37
Abb. 5-1	Erläuterung von Boxplots	64
Abb. 5-2	Boxplots zur Veranschaulichung der statistischen Verteilungen von $k_f$ -Werten bei verschiedenen Gesteinstypen	65
Abb. 5-3	Tiefenabhängige Verteilung der $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Ton/Tonstein	71
Abb. 5-4	Tiefenabhängige Verteilung der $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Mergelstein	72
Abb. 5-5	Tiefenabhängige Verteilung der $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Gneis	73
Abb. 5-6	Tiefenabhängige Verteilung der $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Granit	74
Abb. 5-7	Tiefenabhängige Verteilung der $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Tuffit	75

**Anhang**

Textblätter und Daten-Tabellen

## Zusammenfassung

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AK End) beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) entwickelt Kriterien zur Identifizierung und (vergleichenden) Beurteilung von geologischen Gesamtsituationen, die für die sichere Endlagerung günstig sind. Eines dieser Kriterien betrifft die Grundwassergeschwindigkeit in den Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der weiteren geologischen Barriere in der Umgebung eines möglichen Endlagers.

Die Grundwassergeschwindigkeit wird maßgeblich durch die miteinander verbundenen Gesteinseigenschaften Gebirgsdurchlässigkeit (Wasserdurchlässigkeit im natürlichen Gesteinsverband) und durchflusswirksames Hohlraumvolumen beeinflusst. Daten zu diesen Größen stehen aber zu Beginn der Standortauswahl weder flächendeckend zur Verfügung noch können sie für alle zu betrachtenden Standorte mit ausreichender Belegdichte erhoben werden.

Im Rahmen des Projektes "Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung" soll daher geprüft werden, ob der Gesteinstyp von Gesteinskörpern im Endlagerbereich als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit und das durchflusswirksame Hohlraumvolumen dienen und in entsprechende Kriterien umgesetzt werden kann. Diese Aufgabe soll in zwei Phasen bearbeitet werden: In Phase 1 ist die Datenbasis für eine solche Ableitung zu beurteilen. Im Eignungsfall sind in Phase 2 die Daten für die Kriterienableitung bereit zu stellen und die Kriterien zu entwickeln.

Im vorliegenden Bericht zu Phase 1 werden zunächst ausführlich die **Grundlagen der Grundwasserbewegung** in Gesteinskörpern sowie die Verfahren zur Erhebung der Gebirgsdurchlässigkeit dargestellt. Die **Bewertung der Verfahren** ist eine wichtige Grundlage für die Beurteilung der Datenqualität.

Bei den bislang erfassten und dokumentierten **Daten zur Wasserdurchlässigkeit** handelt es sich um Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) und Transmissivitätswerte. Messwerte zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen liegen nicht vor. Diese Größe wird über den Speicherkoeffizienten erfasst. Nicht alle identifizierten Daten konnten rechtzeitig für diesen beigebracht werden.

Die Daten stammen überwiegend aus dem Anwendungsbereich Endlagerung "konventioneller" und radioaktiver Abfälle. Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen in anderen Anwendungsgebieten stehen dagegen entweder nur in sehr geringem Umfang zur Verfügung (Exploration und Erschließung von Kohlenwasserstofflagerstätten) oder aber enthalten die Informationen über die hier vor allem interessierenden Gesteine mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit in solcher Verdünnung, dass sich die systematische Auswertung aller grundsätzlich verfügbaren Informationen als nicht sinnvoll erwies (Wasserwirtschaft).

Hauptuntersuchungsorte sind Tiefbohrungen und Stollen (Tunnel) von Felslabors. Bei den Tiefbohrungen nehmen Packerversuche eine herausragende Stellung ein. Die größte Anzahl der bisher zusammengetragenen Einzeldaten stammt aus solchen Tests. Sie wurden deshalb bei der Beschreibung der Einzelverfahren besonders ausführlich dargestellt. Die Vorteile dieser Verfahren sind:

- Damit können auch sehr gering durchlässige Gebirgsbereiche tiefengenau getestet werden.
- Ihr Einsatz ist auch in großen Tiefen möglich.
- Sie liefern recht gut abgesicherte Werte, da meist mehrere Packertests nacheinander im selben Testintervall durchgeführt werden.
- Der Erfahrungsstand bei diesen Verfahren ist hoch, sie sind relativ Kostengünstig, da die Versuchsdauer in der Regel im Stunden-Bereich liegt.

Nachteile sind:

- Geringe horizontale Eindringtiefe (Reichweite) in die Gebirgsformation.
- Der Speicherkoeffizient kann nur abgeschätzt werden.
- Aussagen über Aquifermodell, Aquiferränder und Anisotropie sind nur begrenzt mit speziellen Auswerteverfahren möglich.

Die Genauigkeit der Messergebnisse hängt in erster Linie von der Qualität der Datenerfassung ab. Besonders bei geringen Durchlässigkeiten sind genaue Druck- und Mengenmessungen entscheidend. Nach dem heutigen Stand der Technik können aber die durch Messfehler verursachten Datenungenauigkeiten als gering angesehen werden.

Die größte Anzahl von Werten aus Packertests ist mit Einbohrlochversuchen erhoben worden. Sie sind als kleinskalig (Reichweite <10 m) anzusehen und gut miteinander vergleichbar. Auch Fluid-Logging-Daten sind als kleinskalig einzuordnen und zusammen mit Packerversuchsdaten auswertbar. Diese Daten sind aus methodischer Sicht daher für die angestrebte Auswertung geeignet.

Insgesamt liegen bislang ca. 50 Datensätze mit knapp 2200 Einzelwerten (Durchlässigkeitsbeiwerte, Transmissivitäten) von mehr als 20 Lokationen und aus Tiefen bis zu 3370 m unter Geländeoberfläche vor. Gut 1200 Daten entfallen bisher auf kristalline Gesteine und knapp 1000 Daten auf Sedimentgesteine. Bei den kristallinen Gesteinen wurden als Vertreter der Plutonite vor allem Granit und von den Metamorphiten vor allem Gneis erfasst. Bei den Sedimentgesteinen liegen zu den Gesteinstypen Ton bzw. Tonstein, Mergelstein, Tuffit und Steinsalz die meisten Daten vor. Der Rest entfällt auf in den ausgewerteten Quellen teilweise sehr speziell benannte Gesteinstypen (z.B.

Brekzie, Lamprophyr, Aplit) und auf Abfolgen mit Wechsellagerungen (z. B. Tonstein/Sandstein, Kalkstein/ Mergelstein).

Die Datendichte ist bei den einzelnen Gesteinstypen sehr unterschiedlich. Besonders gut belegt sind beim gegenwärtigen Bearbeitungsstand Granit und Gneis mit rund 600 bzw. gut 300 Daten sowie Ton bzw. Tonstein mit zusammen rund 590 und Mergelstein mit über 100 Daten. Auf diese Gesteinsgruppen konzentriert sich die bisherige Auswertung.

Für die **vorläufige Auswertung von Daten** zur hydraulischen Durchlässigkeit aus In-situ-Messungen wurden die Transmissivitätswerte in  $k_f$ -Werte umgerechnet. Unter Beachtung von Gesteinstypen, Untersuchungstiefe und unterschiedlichen Methodenkombinationen ergibt sich gegenwärtig folgendes Bild:

Die gesteinstypbezogene statistische Auswertung zeigt weite Überschneidungsbereiche der Wertebandbreiten für die Gesteinstypen Ton/Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis. Im Hinblick auf bestimmte statistische Kenngrößen, wie Mittelwert oder Medianwert, bestehen jedoch deutliche Unterschiede. Wird zusätzlich die Durchlässigkeit (als  $k_f$ -Wert) in Abhängigkeit von der Testtiefe (unter Geländeoberfläche) betrachtet, ergeben sich folgende Auffälligkeiten:

Die Durchlässigkeitswerte für Ton/Tonstein zeigen eine starke Abhängigkeit von der Untersuchungstiefe. Die Mittelwerte für Messungen oberhalb einer Tiefe von 200 m unter Geländeoberfläche liegen - unabhängig vom Standort - zwischen  $10^{-5}$  und  $10^{-7}$  m/s, unterhalb 200 m unter Geländeoberfläche zwischen  $10^{-11}$  und  $10^{-13}$  m/s. Allerdings stehen aus dem tieferen Bereich bislang nur wenige Daten für die Auswertung zur Verfügung. Weniger ausgeprägt ist die Tiefenabhängigkeit bei Gneis. Bei den  $k_f$ -Werten für Granit ist demgegenüber keine Abhängigkeit von der Testtiefe, sondern vom Standort bzw. standortabhängigen Gesteinseigenschaften festzustellen. Außer bei Ton/Tonstein treten bei den genannten Gesteinstypen relativ hohe Messwerte bis in größere Tiefe auf.

Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen bzw. die effektive Porosität kann aus dem spezifischen Speicherkoeffizienten (Ss) abgeleitet werden. Die messtechnische Erfassung von Speicherkoeffizienten aus Packerversuchen ist jedoch unsicher. Insgesamt liegen ca. 450 Werte vor mit einer Spannweite von  $10^{-9}$  bis  $10^{-4}$ , besonders wenige für Mergelstein und Tuffit. Die Minimalwerte liegen - unabhängig vom Gesteinstyp - bei ca.  $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$ , die Maximalwerte erreichen bei Ton/Tonstein die höchsten Werte. Es ist eine leichte Abnahme der Ss-Werte mit zunehmender Tiefe festzustellen. Sie ist bei Ton/Tonstein am stärksten ausgeprägt.

Zum Vergleich mit Durchlässigkeitswerten wurden Ergebnisse aus Tracerversuchen an zwei Standorten zur Bestimmung der Grundwasserfließgeschwindigkeit aufgenommen. Die ermittelten

Abstandsgeschwindigkeiten bestätigen mit ausgeprägter Richtungsanisotropie bzw. engräumiger Geschwindigkeitsvariation das heterogene Bild der Durchlässigkeitsdaten. Sie belegen, dass in klüftigen, insbesondere kristallinen Gesteinen, lokal schnelle Fluidverbindungen auftreten. Wegen ihrer starken lokalen Bindung (und des Aufwands von Tracerversuchen) eignen sich Abstandsgeschwindigkeiten (bei gering durchlässigen Gesteinen) aber kaum für die Ableitung eines übergeordneten Kriteriums zur Beurteilung der großräumigen Grundwasserbewegung.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der vorläufigen Datenauswertung wie folgt zu werten: Angesichts der Aussagekraft der bereits zusammengestellten Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_f$ -Werte) und ihrer Ergänzbarekeit durch weitere, wahrscheinlich gleichwertige Daten erscheint die Umsetzung der Phase 2 mit ins Detail gehender Datenauswertung zur Charakterisierung von Gesteinstypen gerechtfertigt. Es sind aufschlussreiche Ergebnisse für die Kriterienentwicklung auf Grundlage von Gesteinstypen zu erwarten. Selbst bei grober Untergliederung der Gesteinstypen werden Durchlässigkeitsunterschiede identifiziert werden können. Sie stehen außer mit den spezifischen Eigenschaften der Gesteinstypen auch mit der lokalen Ausprägung und der Tiefenlage von Gesteinskörpern und der Existenz besonderer struktureller Bedingungen in Zusammenhang. Diesen Zusammenhängen ist in Phase 2 gezielt nachzugehen.

Auf Grund messtechnischer Unsicherheiten und geringer "Trennschärfe" im Hinblick auf die Unterscheidung von Gesteinstypen kommt dagegen nach gegenwärtiger Einschätzung der Speicherkoefizient für sich betrachtet nicht für die Kriterienentwicklung in Frage - und damit auch nicht das durchflusswirksame Hohlraumvolumen. Die gezielte Einzelfallbetrachtung zur Verbesserung des Verständnisses eines hydraulischen Systems erscheint jedoch sinnvoll.

## 1. Aufgabenstellung und Gliederung des Berichtes

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AK End) beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat sich die Aufgabe gestellt, Kriterien zur Identifizierung und (vergleichenden) Beurteilung von für die sichere Endlagerung günstigen geologischen Gesamtsituationen zu entwickeln. Eine wichtige beurteilungsrelevante Eigenschaft solcher Situationen stellt die Grundwasserbewegung in den Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der weiteren geologischen Barriere in der Umgebung eines möglichen Endlagers dar.

Ausmaß und Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung und damit des advektiven Transports von aus dem Endlager freigesetzten Radionukliden in Richtung Biosphäre werden maßgeblich durch die miteinander verbundenen Gesteinseigenschaften Gebirgsdurchlässigkeit (die Wasserdurchlässigkeit im natürlichen Gesteinsverband) und durchflusswirksames Hohlraumvolumen beeinflusst. Wegen ihrer Bedeutung für die Endlagersicherheit müssen beide Eigenschaften möglichst frühzeitig bei der Standortauswahl Berücksichtigung finden.

Informationen zu Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksamem Hohlraumvolumen sind für die Standortauswahl aber nicht a priori flächendeckend verfügbar und können während des Auswahlverfahrens auch nicht für alle zu betrachtenden Standorte mit ausreichender Belegdichte erhoben werden. Erfahrungsgemäß liegen aber Gebirgsdurchlässigkeit bzw. durchflusswirksames Hohlraumvolumen bei bestimmten Gesteinstypen innerhalb gewisser Bandbreiten. Es erscheint daher möglich, den Gesteinstyp als Indikator für eine bestimmte Bandbreite der Gebirgsdurchlässigkeit bzw. des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens von Gesteinskörpern zu verwenden und aus dem Zusammenhang zwischen Gesteinstyp und Gebirgsdurchlässigkeit bzw. Hohlraumvolumen Kriterien zur Beurteilung der potenziellen Grundwasserbewegung in der geologischen Barriere abzuleiten.

Das setzt allerdings voraus, dass

- Daten in hinreichender Qualität und Quantität vorhanden sind, um die Beziehung zwischen Gesteinstyp und Wasserdurchlässigkeit bzw. durchflusswirksamem Hohlraumvolumen quantifizieren zu können,
- verschiedene Gesteinstypen anhand von Wasserdurchlässigkeit bzw. durchflusswirksamem Hohlraumvolumen tatsächlich eindeutig unterschieden werden können.

Im Rahmen des Projektes "Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung" sind diese Fragen also zu beantworten, bevor die Kriterienentwicklung in Angriff genommen wird. Das Projekt wird daher in zwei Phasen abgearbeitet:

- 
- Phase 1 Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zu Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksamem Hohlraumvolumen,
- Phase 2 Bereitstellung von gesteinstypbezogenen Daten zu Wasserdurchlässigkeit und durchflusswirksamem Hohlraumvolumen und Formulierung von entsprechenden Kriterien.

Das Ergebnis von Phase 1 entscheidet über die Durchführung der zweiten Phase.

In Phase 1 sind also die Voraussetzungen zur Kriterienentwicklung zu schaffen. Dazu werden

- die Grundlagen der Grundwasserbewegung dargestellt und die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Gebirgsdurchlässigkeit, durchflusswirksamem Hohlraumvolumen und Strömungsgeschwindigkeit sowie die wesentlichen Bezüge zu anderen Gesteinseigenschaften herausgearbeitet,
- die wichtigsten In-situ-Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit und des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens, differenziert nach Anwendungsgebieten und wissenschaftlich-technischer Grundlage der Verfahren, beschrieben,
- die Aussagekraft und die räumliche Repräsentativität der nach verschiedenen Verfahren ermittelten Daten sowie der mit ihrer Anwendung verbundene Aufwand und die vorliegenden praktischen Erfahrungen vergleichend beurteilt,

Am Ende steht die Beurteilung der Datensätze im Hinblick auf ihre Einsetzbarkeit für die Kriterienentwicklung unter Berücksichtigung ihrer Aussagekraft, ihres Umfangs und ihrer Verfügbarkeit. Die detaillierte Auswertung der erhobenen Daten ist - bei positivem Ergebnis der Phase 1 - für Phase 2 vorgesehen.

Die ausgewerteten Datensätze sind im Anhang dokumentiert.

## 2. Grundlagen der Grundwasserbewegung

### 2.1 Grundwasserbewegung in klüftigem Gestein

Generell können zwei Bewegungsarten realer Fluide unterschieden werden:

- laminares Fließen
- turbulentes Fließen

Laminare Strömungen werden von der Zähigkeit (Viskosität), turbulente Strömungen von der Trägheit des Wassers bestimmt. Die laminare Strömungsgeschwindigkeit ist relativ klein und die Energieverluste (innere Reibung) werden direkt aus der potentiellen Energie (Druckdifferenz) gespeist. Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten werden die Energieverluste auch aus der kinetischen Energie gespeist. Das führt, da nun aus zwei unterschiedlichen Energiequellen die Verluste ausgeglichen werden, zu einer turbulenten Strömung. Dabei kommt es zur Wirbelbildung. Der Widerstand ist bei turbulenten Strömungen, durch die Energiebindung in den Wirbeln größer als bei laminaren. Die Grenze zwischen beiden Strömungsarten wird durch die Reynoldszahl (Re) ausgedrückt. Diese dimensionslose Zahl setzt die kinetische Energie zum Reibungsverlust in Beziehung und ist ein Stabilitätskriterium für laminare Strömungen.

Grundwasser in klüftigem Gestein kann laminar, aber auch turbulent fließen. Da die Fließwege und ihre Eigenschaften in Gebirge selten gänzlich bekannt sind ist eine Abschätzung ihrer Anteile an der gesamten Grundwasserströmung schwierig. Insgesamt wird aber der Einfluss von turbulenter Strömung auf die hydraulische Durchlässigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit als gering angesehen. Deswegen werden Kluffgrundwasserleiter vereinfachend meist mit dem Kontinuummodell und die Bewegung als ausschließlich laminar beschrieben.

### 2.2 Die Durchlässigkeit und das äquivalente poröse Medium

Beim Kontinuumsansatz wird das klüftige Gestein als ein äquivalentes poröses Medium betrachtet. Das Bewegungsverhalten des Grundwassers kann dann mit der Darcy-Gleichung beschrieben werden. Sie wurde 1856 von DARCY experimentell ermittelt (**G1**):

$$q = \frac{Q}{F} = k_f \frac{\Delta h}{l} = k_f J$$

$q$  = Ergiebigkeit pro Flächeneinheit

$F$  = Durchflussfläche (m<sup>2</sup>)

$Q$  = durchfließende Wassermenge (m<sup>3</sup>/s)

$\Delta h$  = Druckhöhenunterschied (m)

$l$  = Fließlänge (m)

$k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

$J$  = Druckgradient

Dieses Gesetz hat DARCY aus Laborversuchen mit Sandproben abgeleitet. Dabei gilt Proportionalität zwischen Filtergeschwindigkeit und Druckhöhenunterschied (Standrohrspiegelhöhengefällen, Druckliniengefälle). Der Proportionalitätsfaktor  $k_f$  wird als Durchlässigkeitsbeiwert (oder einfach als Durchlässigkeit) bezeichnet. Er ist ein Maß für die Reibung eines Fluids beim durchfließen eines Gesteins. Dieser Reibungswiderstand tritt dabei im Lockergestein wie auch im Festgestein auf. Damit ist der Durchlässigkeitsbeiwert eine Funktion von Gesteins- und Fluideigenschaften. Hydraulische Messungen ob nun In-situ oder im Labor versuchen diesen spezifischen Wert zur Charakterisierung der Durchlässigkeit zu bestimmen.

Wird die Darcy-Gleichung verallgemeinert und in eine differentielle Form gebracht, ergibt sich das gleiche Ergebnis wie bei der Herleitung über die partiellen Differentialgleichungen der allgemeinen Strömungsgleichungen mit verschiedenen Vereinfachungen wie der Vernachlässigung der Trägheit.

Der Wert  $q$  mit der Einheit m/s ist auch als Filtergeschwindigkeit  $v$  interpretierbar. Diese Geschwindigkeit gibt an, welche Wassermenge durch eine bestimmte Fläche pro Zeiteinheit strömt (**G2**):

$$v = k_f J$$

$v$  = Filtergeschwindigkeit (m/s)

$J$  = Druckgradient

$k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

Ein weiterer, häufig neben dem Durchlässigkeitsbeiwert benutzter Begriff, um die Wasserdurchlässigkeit zu charakterisieren ist, die Transmissivität (**G3**):

$$T = k_f M$$

$M$  = Mächtigkeit der Grundwasserleitenden Schicht (m)

$T$  = Transmissivität (m<sup>2</sup>/s)

$k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

Damit bezeichnet die Transmissivität den Widerstand den eine Grundwasserleitende Schicht einer bestimmten Mächtigkeit dem durchfließenden Wasser entgegenstellt.

Das Darcy-Gesetz unterliegt bestimmten Gültigkeitsbedingungen. Werden die Filtergeschwindigkeiten so groß, dass Trägheitseffekte nicht mehr vernachlässigbar sind, gilt kein linearer Zusam-

menhang zwischen Filtergeschwindigkeit und Druckgefälle mehr. Der Übergang in turbulentes Strömen kann die Abweichung von der Linearität noch verstärken. Bei Porengrundwasserleitern kann das im Bereich grober Kiese oder im Festgestein bei Karst und bei Klüften mit hohen Klüftöffnungsweiten geschehen. Bei sehr kleinen Strömungsquerschnitten kann die untere Grenze der Gültigkeit des DARCY-Gesetzes überschritten werden, wenn die Wirkung der Haftkräfte (elektromolekulare Kraftwirkung) an Bedeutung gewinnt. Das kann in der Matrixdurchlässigkeit von tonigen Sedimenten oder bei sehr geringen Klüftöffnungsweiten im Gestein der Fall sein.

### 2.3 Durchlässigkeit und Fließgeschwindigkeit in Klüften

Im einfachsten Fall wird eine einzelne Kluft als ein durch zwei parallele Platten begrenzter Hohlraum definiert. Wird eine laminare und parallele Strömung in einem dünnen Spalt unter der Annahme, dass die Kluftwandungen parallel und unendlich ausgedehnt sind, betrachtet, gilt nach LOUIS (1967), (G4):

$$\vec{v} = \vec{q} = \frac{g}{12\nu} (2a_i)^2 \vec{J}$$

$\nu$  = Fließgeschwindigkeit parallel zum Spalt

$q$  = Ergiebigkeit parallel zum Spalt

$g$  = Erdbeschleunigung

$\nu$  = kinematische Zähigkeit

$2a_i$  = Spaltöffnungsweite

$J$  = Druckhöhengradient parallel zum Spalt

Unter der Bedingung des idealen Spalts und einer laminaren, parallelen Strömung besteht ein enger Zusammenhang mit dem Gesetz von DARCY. In diesem Fall gilt für den  $k_f$ -Wert (G5):

$$k_f = \frac{g}{12\nu} (2a_i)^2$$

$g$  = Erdbeschleunigung

$\nu$  = kinematische Zähigkeit

$2a_i$  = Spaltöffnungsweite (m)

$k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s).

Wird eine ideale Kluftchar betrachtet, gilt für den Durchlässigkeitsbeiwert parallel zur Klufttrichtung und bei konstanter kinematischer Zähigkeit (G6):

$$k_f = C \frac{(2a_i)^3}{b_i}$$

$b_i$  = mittlerer Kluftabstand (m)

$2a_i$  = Spaltöffnungsweite (m)

$C$  = Konst. =  $g/12\nu$

$k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

Beispiel:

Betrachten wir einen Kluftgrundwasserleiter mit einer parallelen Kluftschar:

$b_i = 0,2$  m (Kluftdichte = 5 Klüfte/m)

$C = 9,81(\text{m/s}^2) / 12 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ , kin. Zähigkeit bei  $16^\circ\text{C}$

$2a_i = 0,001$  m (Kluftöffnungsweite 1 mm).

Nach G6 ergibt sich ein  $k_f$ -Wert von  $3,7 \cdot 10^{-3}$  (m/s) parallel zum Kluftstreichen. Übertragen auf einen Porengrundwasserleiter liegt dieser Wert im Bereich der Durchlässigkeit von sandigem Kies. Die Fließgeschwindigkeit in den einzelnen Klüften beträgt nach G4 dann 0,74 (m/s) wenn ein Druckhöhengradient parallel zur Kluft von 1 angenommen wird. Beim entsprechenden Porengrundwasserleiter beträgt die Filtergeschwindigkeit nach G2 und einem Gradienten von  $1 = 3,7 \cdot 10^{-3}$  (m/s) = 0,0037 m/s.

Die diskreten Fließwege eines Kluftleiters bewirken eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit je stärker einzelne gut leitende Klüfte vorherrschend sind. Nimmt die Trennfugendichte bei gleichem  $k_f$ -Wert zu wird sich die Fließgeschwindigkeit verringern und immer mehr derjenigen von Porengrundwasserleitern angleichen.

Bei starker Klufttrauhigkeit wird die Strömung bei zunehmend geringeren Kluftöffnungen schneller in den nicht parallelen Bereich übergehen. In diesen Fällen hat LOUIS (1967) nicht-lineare Beziehungen zwischen Druckgradient und Fließgeschwindigkeit definiert. Kommt es zu Kontaktflächen der Kluftwandungen treten Windungseffekte auf, die auch im laminaren Bereich zu Abweichungen vom linearen Verhalten führen.

Bei der Untersuchung von zwei Einzelklüften im Granit des Felslabors Stripa (Schweden) haben ABELIN et al (1985) eine Kanalisierung (channelling) der Grundwasserströmung innerhalb der Klüfte festgestellt. Durch Kontaktstellen der Kluftwände kommt es innerhalb der Kluft zu Zonen mit stagnierendem Wasser (lakes). Insgesamt verteilt sich der aktive Grundwasserfluss in der Kluft nur auf etwa 5–20 % der Gesamtkluftfläche. Dies bewirkt eine zusätzliche Diskretisierung der Fließwege in einem Kluftleiter.

## 2.4 Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen

Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen ist dasjenige Volumen, das für die Grundwasserbewegung genutzt werden kann. Es kann sich dabei um ein Porenvolumen als auch um ein Kluftvolumen handeln. Das durchflusswirksame Porenvolumen wird auch als effektives (wirksames oder nutzbares) Porenvolumen, das durchflusswirksame Kluftvolumen als effektives (nutzbares) Kluftvolumen bezeichnet. Meist werden Porenvolumen und Kluftvolumen zusammen als Porenvolumen bezeichnet.

### 2.4.1 Porosität

Das Verhältnis des Porenvolumens am Gesamtvolumen (Gesteinsvolumen) wird als Porosität quantifiziert und generell in Prozent angegeben. Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen kann damit auch als effektive Porosität (advection or flow porosity) bezeichnet werden.

Nicht für die Wasserbewegung genutzt werden kann das Haftwasservolumen. Die Schichtdicke des elektrostatisch gebundenen Haftwassers kann bis zu 4  $\mu\text{m}$  betragen. Klüfte, die eine Öffnungsweite kleiner 8  $\mu\text{m}$  haben können nicht mehr vom Grundwasser durchflossen werden. Auch ein Hohlraum, der im Gesteinsverband von anderen Hohlräumen isoliert ist, kann nicht vom Grundwasser durchflossen werden. Poren oder Klüfte, die nur an einer Stelle mit anderen Hohlräumen verbunden sind, gehören, wenn sie mit Wasser gefüllt sind, nicht zum nutzbaren Volumen der Wasserbewegung. Nutzbar sind sie aber für das Speichervermögen, da sie gefüllt und geleert werden können. Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen wird also in der Regel kleiner sein als das gesamte Hohlraumvolumen und als das Speichervermögen.

Bei den hier betrachteten Gesteinen wie kristalline oder tonige, schluffige Gesteinstypen kann die Porosität unterteilt werden in eine Matrixporosität und eine Kluftporosität. Dabei wird der Anteil der Kluftporosität an der effektiven Porosität sehr viel höher sein als die Matrixporosität. Bei der Kluftporosität oder besser dem effektiven Kluftvolumen können erhebliche Unterschiede zum effektiven Porenvolumen in Bezug zur Grundwassergeschwindigkeit, der Strömungsrichtung, -Verteilung und der Bewegungsart bestehen.

### 2.4.2 Speichervermögen

Das Speichervermögen eines Gesteins wird durch den spezifischen Speicherkoeffizienten  $S_s$  gekennzeichnet. Er gibt die Änderung des gespeicherten Wasservolumens je Volumeneinheit des Gesteins ( $1 \text{ m}^3$ ) bei Absenkung der Standrohrspiegelhöhe (Grundwasserspiegel) um eine Einheit (1m) an. Bei gespanntem Grundwasser gilt (**G7**):

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta)$$

$\rho$  = Wasserdichte = 998,2 kg/m<sup>3</sup> bei 20 C

$\beta$  = Fluidkompressibilität Pa<sup>-1</sup>

$g$  = Erdbeschleunigung = 9,81 s<sup>-2</sup>

$n$  = effektive Porosität bzw. effektiver Hohlraumanteil

$\alpha$  = Gesteinskompressibilität Pa<sup>-1</sup>

Für den Speicherkoeffizienten  $S$  wird die Mächtigkeit  $M$  des betroffenen Grundwasserkörpers, bzw. die Grundwassermächtigkeit benötigt (**G8**):

$$S = S_s M$$

Bei hydraulischen Versuchen in Bohrlöchern wird meist das Packerintervall für  $M$  eingesetzt. Wie auch bei der Transmissivität ist auch hier ohne weitere Untersuchungen die tatsächliche aktive hydraulische Mächtigkeit unbekannt. Durch Skin-Effekte und Brunnenspeicherung kann es zu weiteren Messfehlern kommen.

Alternativ werden Speicherwerte auch aus den Fluid- und Gesteinseigenschaften abgeleitet. Bei den Wellenberg Tiefbohrungen SB1 und SB2 (ADAMS & WYSS, 1994) wurde folgende Methode angewandt:

Für die Gesteinskompressibilität gilt die Beziehung (GRISAK et al., 1985), (**G9**):

$$\alpha = \frac{1}{B} = \frac{3(1-2\nu)}{E} \approx \frac{1}{E}$$

$\alpha$  = Gesteinskompressibilität Pa<sup>-1</sup>

$E$  = Elastizitätsmodul

$\nu$  = Poisson-Verhältniss

$B$  = Kompressionsmodul

$E$  wird von Dilatometertests und  $B$  von Sonic-Logs abgeleitet.  $\nu$  variiert zwischen 0,1 bis 0,3. Dabei wird  $B \approx E$  gesetzt. Die Porosität wird aus Laborversuchen an Bohrkernen bestimmt. Die Fluidkompressibilität wird Standardtabellen entnommen. Damit kann der spezifische Speicherkoeffizient  $S_s$  näherungsweise mit Formel G7 bestimmt werden. Für die getestete Formation in den Tiefbohrungen SB1+2 ergaben sich  $S_s$  zwischen 2e-7 bis 6e-7 (m-1).

Sensitivitätsstudien zeigen, dass bei geringen Durchlässigkeiten ( $k_f$   $1e-11$  –  $1e-12$  m/s) die abgeleitete hydraulische Durchlässigkeit etwa um eine Größenordnung variiert, wenn der spezifische Speicherkoeffizient  $S_s$  um zwei Größenordnungen variiert. Bei höheren Durchlässigkeiten ist der  $k_f$ -Wert relativ insensitive gegenüber Variationen von  $S_s$  (BELAGER et al, 1989).

## 2.5 Tiefenzunahme

Mit zunehmender Tiefe unter der Erdoberfläche ändern sich die physikalischen Eigenschaften von Wasser und Gestein. Die mit der Tiefe erhöhten Parameter Druck und Temperatur haben Einfluss auf die Durchlässigkeit. Wird der  $k_f$ -Wert als Funktion von Material- und Fluideigenschaften ausgedrückt, ergibt sich folgende Gleichung (**G10**):

$$k_f = \frac{Kpg}{\mu}$$

$k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert

$\rho$  = Dichte des Wassers

$K$  = Permeabilität

$\mu$  = dynamische Viskosität (Reibung zwischen den Molekülen)

$g$  = Erdbeschleunigung

Die Permeabilität  $K$  ist ein auf das Gestein bezogener Parameter und beschreibt das Leitungsverhalten seines Hohlräumsystems bezüglich Gasen und Flüssigkeiten unabhängig von deren Beschaffenheit. Die dynamische Viskosität von Wasser ist vorwiegend von der Temperatur abhängig und nimmt mit steigender Temperatur ab. Nach STOBBER (1995) ist die dynamische Viskosität der dominierende Parameter, so dass der  $k_f$ -Wert hauptsächlich von der Wassertemperatur und nur geringfügig vom Wasserdruck abhängt. Rel. unabhängig von den Gebirgseigenschaften nimmt die hydraulische Leitfähigkeit mit der Tiefe entsprechend der geothermischen Tiefenstufe zu. Bei 60 °C ist die Leitfähigkeit dreimal so groß wie oberflächennah.

Der Speicherkoeffizient definiert nach G7 beruht auf dem effektivem Hohlraumanteil, der Kompressibilität der Gesteinshohlräume und des Wassers (Fluids), Wasserdichte und Erdbeschleunigung. Bei harten Gesteinen wie dem kristallinen Grundgebirge ist die Kompressibilität der Gesteinshohlräume geringer als diejenige des Wassers. Der Speicherkoeffizient wird dann von der Dichte und Kompressibilität des Fluids bestimmt (STOBBER, 1995).

Durch den Dichteunterschied zwischen Gestein und Wasser steigt der hydrostatische Druck mit der Tiefe geringer als der lithostatische Druck und der Frac-Druck des Gesteins. Bei tonigen Gesteinen kommt es aber, durch eine zunehmende Kompaktion des Korngefüges, ab einer Tiefe von

ca. 1 km zu einem ansteigen des Porenwasserdrucks. Dies hat u.a. zwei Effekte zur Folge (BJORLYKKE (1999)):

- Zunahme der Durchlässigkeitsanisotropie durch Ausrichtung der Tonminerale senkrecht zum größten Stress.
- In Tiefen über 2-3 km kann der Porenwasserdruck den Frac-Druck des Gesteins übersteigen und Klüfte reißen auf.

Diese Effekte können auch nach einer Hebung toniger Gesteine eine ausgeprägte anisotrope Klüftigkeit bewirken.

### **3. Methodendarstellung und -bewertung**

#### **3.1 Einflussvolumen**

Die räumliche Repräsentativität von Parametern wie Durchlässigkeiten, Speicherkoeffizienten usw., die bei In-situ-Versuchen ermittelt werden, bezeichnet das durch den Versuch selbst beeinflusste Gebirgsvolumen, hier kurz Einflussvolumen genannt.

Anisotrope und inhomogene Gesteinskörper, wie es Festgesteinskörper in der Regel sind, zeigen bei Messungen, je nach dem welcher Volumenanteil betrachtet wird, unterschiedliche Werte der hydraulischen Parameter. Wird z.B. kleinräumig eine Kluftzone untersucht ergibt sich ein anderer Durchlässigkeitswert als eine benachbarte Untersuchung im intakten Gesteinsverband. Ein dritter Durchlässigkeitswert wird sich einstellen, wenn ein größeres Gebirgsvolumen das beide Bereiche Kluftzone und intaktes Gestein umfasst, untersucht wird. Alle drei gemessenen unterschiedlichen Durchlässigkeiten liefern integrale Aussagen über unterschiedliche Gebirgsvolumina des Gesamtgebirges. Die diskreten einzelnen Fließwege im Gestein werden nur selten und nur in speziellen Forschungsprogrammen erfasst. Im Grimsel-Felslabor (Schweiz) z.B. konnte im granodioritischem Gestein eine Einzelkluft näher untersucht werden. Mit Markierungsversuchen wurden dabei Fließgeschwindigkeiten von einigen Metern pro Stunde ermittelt (HOEHN et al., 1990).

Sind die Messwerte korrekt ermittelt und ausgewertet, dann können sie für das entsprechende Einflussvolumen als repräsentativ gelten. Werden viele solcher Messungen mit unterschiedlichen Einflussvolumina in verschiedenen Gebirgsabschnitten durchgeführt, so können Bandbreiten der Messwerte in bestimmten Skalenbereichen angegeben werden. Eine Bandbreitenangabe über alle Skalenbereiche eines Gebirgskörpers ist nur dann sinnvoll, wenn auch alle Bereiche repräsentativ erfasst sind. Liegen z.B. nur Durchlässigkeitsbestimmungen im  $\text{cm}^3$ - und im  $\text{km}^3$ -Bereich vor, sind eventuell bestimmte hydraulisch wirksame Gefügeelemente nicht erfasst. Sie werden zwar im größeren Maßstab mit in den integralen Wert eingehen, aber es bleibt unklar, welchen Anteil sie daran haben. Das Einflussvolumen eines In-situ-Versuchs ist also ein Maß für die Einordnung der Messwerte in einen bestimmten Skalenbereich. Werden Messwerte aus unterschiedlichen Skalenbereichen miteinander verglichen kann es zu nur zufälligen Übereinstimmungen oder Abweichungen kommen, die keine wirkliche Relevanz haben.

Für granitische Gesteine gehen SCHULZE-MAKUCH & MALIK (2000) von einer anderen Modellvorstellung aus. Dabei bewegt sich das Grundwasser in vernetzten Klüften und fließt dem Bohrloch bei hydraulischen Tests aus dem gesamten Kluftnetzwerk zu und ist nicht begrenzt auf den Testbereich. Auch wenn Tests nur Teile des Netzwerkes erfassen, ist die gemessene Transmissivität mit anderen Tests, die z.B. größere Netzwerkbereiche einbeziehen vergleichbar.

Bei anisotropen Trennflächengefügen wie bei einer vorherrschenden Kluftschar ist mit richtungsabhängigen Durchlässigkeiten zu rechnen. Diese kann z.B. in Streichrichtung der Klüfte höher sein

als senkrecht dazu. Damit wird auch die Durchflussrichtung durch ein Einflussvolumen für die Größe der hydraulischen Parameter signifikant. Auch Schichtflächen bewirken eine anisotrope Durchlässigkeit. Im HADES Untergrundlabor bei MOL (Belgien) ist die Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert) im tertiären Boom-Ton parallel zur Schichtung etwa doppelt so hoch wie senkrecht dazu CANNIÈRE et al. (1994).

Bei Bohrlochversuchen wird oft die Reichweite als radiale Einflussentfernung vom Bohrloch verwendet. Bei Pumpversuchen z.B. entspricht die Ausdehnung des Absenkungstrichters der Reichweite des Pumpversuchs. Wird zur Reichweite die Grundwassermächtigkeit (bei vollkommenen Brunnen) oder unter der Annahme vernachlässigbarer vertikaler Strömungskomponenten, die Bohrtiefe (bei unvollkommenen Brunnen) bzw. das Testintervall (bei Packertests) berücksichtigt, kann das Einflussvolumen angegeben werden.

Eine exakte Bestimmung der Reichweite eines Versuchs ist nur selten möglich, z.B. bei einem Pumpversuch mit Beobachtungspegeln, und kann meist nur abgeschätzt werden. Für gespannte Grundwasserverhältnisse kann eine näherungsweise Abschätzung der Reichweite mit der empirischen Formel von DE MARSILY (1986) oder nach COOPER & JACOB (1946) erfolgen:

DE MARSILY (1986):

$$r_i = \sqrt{\frac{2,25Tt}{S}}$$

COOPER & JACOB (1946):

$$r_i = 90 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

$r_i$  = Reichweite (m)

$t$  = Versuchszeit in (h)

$T$  = Transmissivität

$S$  = Speicherkoeffizient

Beide Formeln kommen zum selben Ergebnis. Danach wird die Reichweite um so größer, je höher die Transmissivität und Versuchszeit und je kleiner der Speicherkoeffizient ausfallen. Das Verhältnis  $T/S$  bzw.  $k_f/S_s$  ( $T$ =Transmissivität,  $S$ =Speicherkoeffizient,  $k_f$ =Durchlässigkeitsbeiwert,  $S_s$ =spezifischer Speicherkoeffizient) wird als hydraulische Diffusivität bezeichnet. Es ist das Verhältnis der Kapazität des Fluidtransportes zur Kapazität Fluide zu Speichern oder abzugeben. Damit gilt, dass je kleiner die hydraulische Diffusivität und je kürzer die Versuchszeit desto geringer die Reichweite eines Versuchs.

Die räumliche Repräsentativität, die einzelne Untersuchungsmethoden erreichen können hängt neben den hydraulischen Parametern von der Untersuchungszeit und der Größe des Untersuchungsbereichs ab. Dabei werden Methoden, die üblicherweise mit kurzen Testzeiten in einem kleinen Untersuchungsbereich gefahren werden gegenüber Langzeitversuchen mit mehreren Beobachtungsstellen um mehrere Größenordnungen kleinere Einflussvolumina haben. Bei schnellen Packertests in gering durchlässigem Gebirge kann die Reichweite nur im cm-Bereich liegen. Tabelle M1 zeigt Beispiele von Reichweiten für einzelne Methoden. Besonders Packertests mit kurzen Versuchszeiten wie z.B. Pulse- oder Slug-Tests haben die geringsten Reichweiten. Bei kleinen Testintervallen von z. B. 2 m bleibt das Einflussvolumen auf wenige m<sup>3</sup> begrenzt. Diese Tests sind notwendig, um spezielle Gebirgsabschnitte zu testen und können auch bei sehr geringen Durchlässigkeiten eingesetzt werden.

Durch den Bohrvorgang und die Spülungszirkulation wird die hydraulische Durchlässigkeit um das Bohrloch verändert. Dabei kann die Durchlässigkeit gegenüber der unbeeinflussten Formation erhöht oder erniedrigt sein (Skin-Effekte). Eine Erniedrigung der Durchlässigkeit kann durch eindringende dichtende Spülungen in die Bohrlochwand verursacht werden. Eine Verbesserung der Durchlässigkeit kann z.B. durch erosive Vorgänge, Ausspülen von feinkörnigem Material aus der Bohrlochumgebung, entstehen. Bei hydraulischen Langzeitversuchen, wie Pumpversuchen, wird die Reichweite des Versuchs sehr wahrscheinlich die Reichweite der Skin-Zone um ein vielfaches übersteigen. Dann kann mit den Anfangsverläufen der Druck/Zeit-Kurven der Skin auch quantitativ abgeschätzt werden. Bei hydraulischen Packer-Tests mit kurzer Versuchsdauer besteht die Gefahr, dass die Reichweite die Skin-Zone um das Bohrloch nicht übersteigt und damit eine künstlich veränderte Durchlässigkeit gemessen wird.

### **3.2 Reproduzierbarkeit von Testdaten, Erfahrungsstand und Aufwand einzelner Methoden**

Die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit einzelner In-situ-Versuchsergebnisse hängt davon ab, wie genau sie im Gebirge lokalisiert sind. Bei Bohrlochversuchen ist das die Tiefengenaugigkeit. Da oft mehrere Versuche über die Tiefe miteinander gekoppelt werden, z. B. Zuflussbereiche die mit Flowmeter-Logs detektiert und anschließend mit Packertests genauer untersucht werden, kommt ihr eine besondere Bedeutung zu. In Tabelle 3-1 sind Tiefengenaugigkeiten angegeben. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Reproduzierbarkeit von Testergebnissen ist die Aquiferstörung. Wurde der Aquifer durch einen Test in seinen Gleichgewicht gestört, muss für den folgenden Test erneut der Gleichgewichtszustand abgewartet werden um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Oft kann dabei die Wiedereinstellung des Gleichgewichts pro Zeiteinheit gemessen, und so zusätzliche Daten gewonnen werden.

Der Aufwand einzelner Untersuchungsmethoden ist sehr unterschiedlich. Insgesamt ist bei dem hier interessierenden Untersuchungsgegenstand, gering durchlässiger Gesteine in größeren Tiefen, von einem erhöhtem Kostenaufwand und gegenüber Standardversuchen bei der Wasserschließung auszugehen. Eine qualitative Abschätzung ist in Tabelle 3-1 angeführt.

Der Erfahrungsstand einzelner Methoden hängt mit ihrer Anwendungshäufigkeit zusammen. In der folgenden Aufstellung sind hydraulische In-situ-Methoden bei den hier untersuchten Standorten in der Reihenfolge ihrer rel. Anwendungshäufigkeit angeführt:

1. Einbohrloch-Packerversuche (WD-, Injektions-, Pump-, Slug-, Bail-, Drill-Stem- und Pulse-Tests): Meist werden pro Testlauf mehrere Tests hintereinander geschaltet und mit mehreren Druckstufen, Druckentlastungen und mit konstanter Fließrate oder mit konstantem Druck gearbeitet. Bei besonders geringen Durchlässigkeiten von  $k_f < 10^{-7}$  wird vorwiegend mit Pulse-Tests gearbeitet.
2. Fluid-Logging: Die Methode kann gut mit Packertests kombiniert werden um die genaue Tiefenlage von Zu- und Abflusszonen im Bohrloch zu lokalisieren. Es ist aber auch als Einzelmethode geeignet um Klufftransmissivitäten zu gewinnen (quantitatives Fluid-Logging).
3. Mehrbohrloch-(Packer)Versuche (Interferenztests): Sie sind wesentlich aufwendiger als Einbohrlochversuche und werden deshalb auch seltener durchgeführt. Dazu zählen Langzeitpumpversuche mit Piezometermessung, Packerversuche wo z. B. eine Kluffzone durch mehrere Bohrungen durchteuft und entsprechend abgepackert wird. Tracerversuche, die auch als Mehrbohrloch-Packerversuch ausgeführt werden können. Insgesamt erfassen solche Versuche einen größeren Gebirgsbereich (Reichweite, Einflussvolumen) als Einbohrlochversuche.
4. Ventilationsversuche: Diese Methode erfordert einen Stollen und lange Versuchszeiten von Wochen bis zu Monaten. Entsprechend selten wird sie angewandt (z.B. Grimsel-Felslabor (Schweiz), Stripa-Felslabor (Schweden)). Ventilationsversuche erfassen sehr große Gebirgsbereiche von über  $100\,000\text{ m}^3$  und liefern damit sog. Makropermeabilitäten.

### **3.3 Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Verfahren**

Im Idealfall sollten die gemessenen hydraulischen Parameter unabhängig von der eingesetzten Untersuchungsmethode sein. In der Realität ist das aber nicht zu verwirklichen. Gerade im Bereich geringer Durchlässigkeiten werden an die technischen Versuchsbedingungen extrem hohe Anforderungen gestellt. Die Versuchszeiten sind wesentlich höher und eine Gleichgewichtseinstellung des gestörten Aquifers sind nicht immer gegeben.

AMMANN et al. (1993) hat an Bohrungen in der Unteren Süßwassermolasse bei Burgdorf (Schweiz) zwei Fluid-Logging-Verfahren (Packerflowmeter, dynamisches Leitfähigkeitslogging) und WD-Tests (Lugeon-Versuche) in den gleichen Tiefenbereichen einer Bohrung untersucht (Abb. 3-1). Die Übereinstimmung der beiden Fluid-Logging-Methoden mit maximalen Unterschieden von Faktor 3 bei den gemessenen Transmissivitäten kann als sehr gut angesehen werden. Die Abweichungen zu den WD-Versuchen sind dagegen deutlich höher.

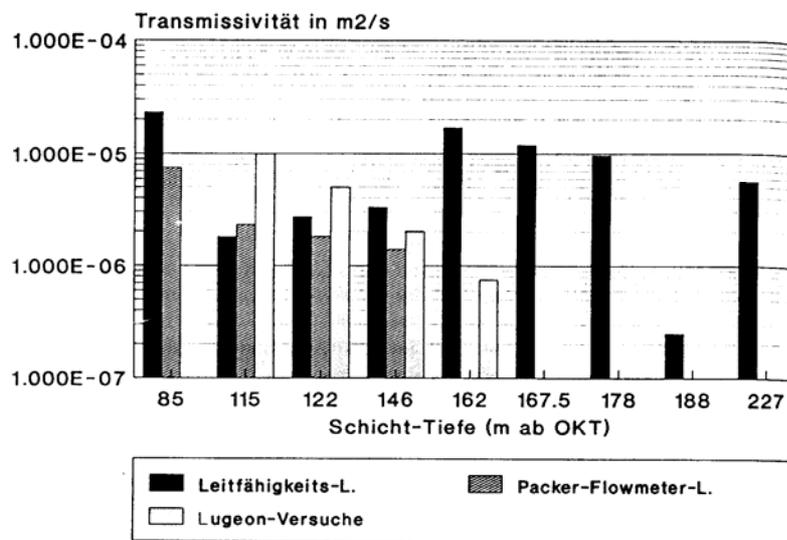


Abb. 3-1 Fluid-Logging und Lugeon-Test-Resultate: Vergleich der Transmissivitätswerte aus AMMANN et al. (1993)

Um solche Unterschiede in den Messergebnissen auszugleichen werden bei größeren Untersuchungsvorhaben meist mehrere Verfahren kombiniert und Min./Max.- sowie Mittelwerte gebildet.

Weitere Beispiele für Versuchskombinationen:

Im HADES Untergrund-Labor (Belgien) wurde der Boom-Ton mit verschiedenen hydraulischen Methoden untersucht:

In-situ, mit Mehrbohrlochversuchen in vertikalen und horizontalen Piezometern durch Auslaufversuche am offenen Filter und als Druckaufbauversuch bei abgepackter Filterstrecke.

Im Labor, durch Perkolationsversuche an Bohrkernproben (Anhang: Tabelle BMBC2) (DE CANNIÈRE et al. (1994). Besonders Auslaufversuche unter natürlichen Druckverhältnissen sind bei toni-

gen Gesteinen besonders interessant, da normalerweise mit sehr viel höheren Drücken gearbeitet wird.

Im französischen Tunnel Tournemire werden die Ton- und Mergelsteine des Lias mit Pulse-Tests, WD-Tests (Lugeon-Versuchen) und Injektionstests (Messung von Druckaufbau und Druckerholung) hydraulisch erforscht (BARBREAU & BOISSON, 1994).

An Opalinuston-Vorkommen am Nordrand der Schwäbischen Alb sind im Rahmen des Forschungsprojektes „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“ des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg eine Reihe von hydraulischen Bohrlochtests und Feldmethoden eingesetzt worden. Mit dem Ziel, potentielle Deponiestandorte zu erkunden wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen (HEKEL, 1994):

- Zur Vorerkundung möglicher wasserwegsamer Klüfte eignen sich optische und akustische Bohrlochmessverfahren (Fernsehkamerabefahrung, Borehole-Televiwer).
- Quantitative Aussagen über die Gebirgsdurchlässigkeit liefern Doppelpackertests (Pump-, Slug-, Drill-Stem- und Pulse-Tests). Alternativ können Fluid-Logging-Verfahren zur Lokalisierung und Quantifizierung von Klufzuflüssen eingesetzt werden. In der ungesättigten Zone werden Injektionstests empfohlen.

Die hydraulischen Eigenschaften der Valanginium-Mergel am Standort Wellenberg (Schweiz) werden mit Puls-, Slug-Tests (const. pressure, const. flow rate), Druckerholungs-Messungen und quantitativem Fluid-Logging erforscht (ADAMS & WYSS, 1994).

Im Grimsel-Felslabor (Schweiz) werden die hydraulischen Parameter des granitischen Gesteins z.B. mit Mehrbohrloch-Packerversuchen (Injektionstests) und als Pilot-Projekt, mit Mehrbohrloch-Fluid-Logging-Versuchen untersucht (GUYONNET et al., 1992).

Das Kristallin der Nordschweiz wurde in Tiefbohrungen vorwiegend mit Packerversuchen erkundet. Dabei kam meist eine Kombination von Slug-, Pulse, Drill-Stem- und Pump-Tests zum Einsatz (LEECH et al., 1984).

Zusätzlich zu diesen hydraulischen Versuchen werden bei Tiefbohrungen eine Reihe von geophysikalischen Standardverfahren eingesetzt um zusätzliche Informationen, mögliche Zuflussbereiche und ihre Tiefenlage, zu erhalten (Kaliber-Log, Salinitäts-Log, Temperatur-Log, Gamma-Log, Microlog usw.).

### **3.4 Auswerteverfahren hydraulischer Versuche**

Hydraulische Problemstellungen können nach DAVID (1997) in folgende Arbeitsschritte untergliedert werden:

- Problemstellung
- Gedankliches Ausschneiden des Problems aus dem natürlichen Gesamtzusammenhang
- Fassung in ein Modell
- Modellbeschreibung mit Schematisierung und Gebietsbestimmung
- Aufstellen der Differential- bzw. partiellen Differential-Strömungsgleichungen.
- Festlegen der Anfangs- und Randbedingungen
- Eventuelle äquivalente Formulierungen
- Formulierung des Strömungsproblems
- Suche nach einem Lösungsverfahren

In einfachen Fällen bzw. durch Verwendung eines einfachen Modells führen analytische Methoden zu geschlossenen Lösungsfunktionen. Numerische Verfahren können auch bei komplexeren Fällen (Modellen) eingesetzt werden.

#### **3.4.1 Analytische Lösungen**

Hydraulische Tests wie Slug-, Pulse-, Drill-Stem- oder Pump-Tests liefern Druck-Zeit Kurven, die von den hydraulischen Eigenschaften der getesteten Formation abhängen. Für die Auswertung werden bestimmte ideale Bedingungen wie Homogenität, Isotropie, unendliche Aquiferausdehnung usw. angenommen um im Kontinuumsansatz die Strömungsgleichungen zu lösen. Für jeden Test-Typ sind spezielle Lösungen entwickelt worden. Generell werden Lösungen für Kluffleiter verwendet, in denen ein äquivalentes poröses Medium zugrunde gelegt wird. Ist die Trennflächengeometrie und ihr hydraulisches Verhalten bekannt, können auch analytische Lösungen für den diskreten Ansatz (Kluffleiter-Ansatz) eingesetzt werden.

Die analytische Auswertung kann mit Hilfe von Typkurven vorgenommen werden, die eine repräsentative Parameter-Range abdecken. Dabei werden die Typ-Kurven graphisch mit den Felddaten-Kurven verglichen und so die hydraulischen Parameter bestimmt. Vorteile der analytischen Lösungsverfahren sind eine schnelle, leichte Abschätzung der Strömungsverhältnisse. Nachteilig ist, dass nur einfache Strömungssysteme berechnet werden können.

### **3.4.2 Numerische Lösungen**

Die durch Differentialgleichungen beschriebenen Modelle der Grundwasserströmung werden zunehmend numerisch gelöst, d.h. durch Rechenprogramme simuliert. Bei den Diskretisierungsverfahren für partielle Differentialgleichungen werden vorwiegend Finite Differenzen-, Finite Volumen- und Finite Elemente-Verfahren eingesetzt. Solche Programme erlauben die Berücksichtigung z.B. der Bohrlochgeschichte (Skin) oder thermischer Effekte bei der Versuchsauswertung.

Die Grundidee numerischer Lösungsverfahren ist die Schematisierung und Diskretisierung des Strömungsgebietes. Für jede Diskretisierung werden Differenzgleichungen aufgestellt. Damit entstehen Einzellösungen an Stützstellen (Knoten), die durch Interpolation Werte für beliebige Punkte liefern können.

## **3.5 In situ-Verfahren für hydrogeologische Fragestellungen**

### **3.5.1 Hydraulische Methoden**

Bei den hydraulischen Methoden wird mit einem bekannten Signal (positive oder negative Druckänderung) auf ein unbekanntes System, den Aquifer, eingewirkt. Die Reaktion des Systems (Druckabsenkung, Druckanstieg bzw., Wasserspiegelabsenkung, -anstieg) wird während des Versuchs pro Zeiteinheit aufgezeichnet. Nach Signalende kann auch die Rückkehr des Systems in seinen Gleichgewichtszustand gemessen werden. Bei Langzeitpumpversuchen oder Injektionsversuchen wird die dem Aquifer mitgeteilte Wasserstands- oder Druckänderung über einen längeren Zeitraum beobachtet. Nach STOBBER (1993) können nur bei Langzeitpumpversuchen Aussagen über das Strömungsverhalten bzw. über das Aquifermodell gemacht werden. Bei allen anderen hydraulischen Tests wird das Modell der Auswertung implizit vorgegeben (meistens ein homogener isotroper Aquifer).

Mit hydraulischen Bohrlochversuchen wird gegenüber Langzeitpumpversuchen nur eine horizontale Reichweite im m-Bereich (1-10 m) erreicht (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 1991).

#### **3.5.1.1 Langzeitpumpversuch (Aquifertest) und Injektionsversuch**

Messverfahren:

Bei Pumpversuchen wird Grundwasser aus einem Brunnen über einen bestimmten Zeitraum entnommen. Aus den Änderungen der Wasserstände im Brunnen und in Pegeln können geohydraulische und betriebstechnische Informationen gewonnen werden. STOBBER (1986) gibt Empfehlungen zur Durchführung von Pumpversuchen im Festgestein für Aquifertests:

- Wiederanstiegsmessung, Dauer mindestens die Hälfte des Brunnentests.
- Einstufiger Aquifertest, Dauer 100 - 500 h. Die Versuchsdauer wird durch das Einsetzen der radialen Fließperiode bestimmt und soll mindestens eine logarithmische Dekade umfassen d.h. wenn nach 10 h die radiale Fließperiode einsetzt sollte der Aquifertest mindestens 100 h dauern.
- Wiederanstiegsmessung, Dauer mindestens die Hälfte des Aquifertests.

Beim Versuch wird die Förderrate konstant gehalten und die Wasserspiegelmessungen werden äquidistant im logarithmischen Maßstab vorgenommen. Bei Thermalwasser sind Temperaturmessungen zur Korrektur der Wasserspiegelmessungen notwendig.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Die Auswertung von Pumpversuchen gliedert sich in mehrere Phasen. Nach Vorliegen der gemessenen Absenk- und Wiederanstiegsdaten und Auftragen der Messdaten kann in einer ersten Auswertungsphase, die Identifikation des Modells einsetzen. STÖBER (1986) beschreibt verschiedene Modellvorstellungen:

- 1) Kluftaquifer mit starker Wasserführung auf schmalen Horizonten und geringe Durchlässigkeit in mächtigen Horizonten. Leit- und Speicherschicht-Wechselfolge.
- 2) Zwei-Porositätsmedium (Klüfte und Intergranular), dabei ist die hydraulische Leitfähigkeit der Klüfte größer als die der Matrix. Es kann sich auch um zwei hydraulisch unterschiedlich wirkende Trennflächensysteme handeln.
- 3) Modelle für einen Aquifer mit einer endlich dimensionierten Vertikalkluft.
- 4) Horizontale "penny-shape"-Kluft.
- 5) Modelle zur Brunnenspeicherung und Skin (= Zone veränderter Durchlässigkeit in Bohrlochnähe).

Für verschiedene hydraulische Modelle liegen Typkurven vor, die mit den gemessenen Absenkdaten verglichen werden können.

Nach der Modellidentifikation kann die Ermittlung von Aquiferparametern und brunnenspezifischen Kenngrößen erfolgen. Dabei können folgende Parameter, je nach hydraulischem Modell, ermittelt werden:

- Leitvermögen der Aquifere: Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwert, Permeabilität, Transmissibilität.
- Speichervermögen des Aquifers: Speicherkoeffizient, spezifischer Speicherkoeffizient, nutzbare Porosität.

- Kluftaquifer: Kluftweite, Kluftlänge, Speicherverhältnis und Durchlässigkeitsverhältnis bei Zweiporositätsmedien usw.
- Brunnen-Kennwerte: Brunnenspeicherung (Eigenkapazität des Bohrlochs) oder Skin.
- Eigenschaften hydraulisch wirksamer Ränder wie dichte Talränder, Störungen, infiltrierende Oberflächengewässer, benachbarte infiltrierende Gesteinsverbände usw.), Leakagefaktor, hydraulische Entfernung des Randes, hydraulischer Widerstand.

In der Regel ermöglichen Pumpversuche die Bestimmung von Durchschnittswerten im Durchlässigkeitsbereich von  $10^{-2}$  -  $10^{-7}$  m/s. Bei sehr geringen Durchlässigkeiten besteht die Gefahr eines leerpumpens des Bohrlochs ohne das genügend Wasser nachfließt. Bei sehr hohen Durchlässigkeiten kann die Pumpe dagegen nicht die erforderliche Förderleistung erreichen um eine auswertbare Absenkung zu erzielen.

Der Injektionsversuch entspricht dem Pumpversuch, nur dass anstelle der Wasserentnahme Wasser eingepresst wird. Durchführung und Auswertung entsprechen dem Pumpversuch. Wird mit hohen Drücken gearbeitet, kann es zu einer elastischen oder auch dauerhaften Reaktion des Aquifers kommen. Das Aufweiten oder Aufreissen von Klüften verändert dann die hydraulischen Eigenschaften des Aquifers (Frac-Versuche). Mit Überdruck wird auch bei den Packerversuchen gearbeitet, die im nächsten Kapitel besprochen werden.

### **3.5.1.2 Packertests**

Bei Packertests werden bestimmte Bohrlochabschnitte, meist mit aufblasbaren Gummimanschetten, dicht abgeschlossen. Beim Einfachpackertest wird das Bohrloch in einer bestimmten Tiefe nach oben abgesperrt, nach unten bildet die Bohrlochsole eine Begrenzung. Werden zwei Packer verwendet, können einzelne Bohrlochintervalle gezielt isoliert und untersucht werden. Mit Multipackern wird eine ganze Reihe von Bohrlochintervallen gleichzeitig getestet. In die abgepackerten Testintervalle führt eine Druckmessleitung, die den Intervalldruck zu einem Druckmesssystem überträgt und eine Flussleitung, mit der Ausfluss und Injektion von Flüssigkeiten geregelt werden können.

### **Abpress-, Auslaufversuche**

Messverfahren:

Wasser wird unter konstantem Druck (Constant Head) oder mit konstanter Fließrate (Constant Flow) entweder in die abgepackte Versuchsstrecke injiziert (Abpressversuch) oder daraus entnommen (Auslaufversuch). Daraus ergeben sich folgende Kombinationen:

- Auslaufversuch mit konstantem Druck (Atmosphärendruck) und variabler Auslaufrate. Bei geöffnetem Ventil wird der Wasserausfluss kontinuierlich gemessen. Der Druck im Testintervall fällt dadurch nach einiger Zeit auf Atmosphärendruck und bleibt konstant
- Auslaufversuch mit konstanter Fließrate und variablem Druck. Die Ausflussmenge kann mit einem Ventil reguliert und kontrolliert werden. Aufgezeichnet wird die Druckreduktion im Testintervall. Diese Versuchsanordnung ist bei hohen Durchlässigkeiten sinnvoll, wo die Flussleitung den Gebirgswasseranfall nicht vollständig ableiten kann und damit kein konstanter Atmosphärendruck gewährleistet ist (Rückstau).

Bei sehr geringen Durchlässigkeiten können Auslaufversuche in Bohrloch-Packerversuchen nicht mehr eingesetzt werden. In solchen Fällen und auch im Bereich von ungesättigten Zonen liefern nur Injektionstests auswertbare Messergebnisse:

- Abpressversuch mit konstantem Druck im Testintervall und variabler Fließrate (injection test with constant head).
- Abpressversuch mit konstanter Fließrate und variablem Druck (injection test with constant flow)

Auswerteverfahren und Untersuchungsziel:

Die Zeitabhängige Änderung der Wasserflussmenge oder des Intervalldrucks wird als Kurve aufgezeichnet. Analytisch können daraus der Durchlässigkeitswert und der Speicherkoeffizient ermittelt werden (COOPER & JACOB 1946, JACOB & LOHMAN 1952), siehe auch WD-Test.

### **WD-Test (Wasserabpress-Versuch, Wasserdruck-Versuch)**

Messverfahren:

Beim WD-Test wird eine unverrohrte Bohrlochstrecke mit Packern nach oben und unten oder nur nach oben abgedichtet. In diesem Bohrabchnitt wird Wasser in verschiedenen Druckstufen verpresst wobei während der einzelnen Druckstufen eine konstante verpresste Wassermenge angestrebt wird.

Werden die Einpressmenge gegen den Druck aufgetragen ergeben sich charakteristische Kurven. Diese Druck-Mengen-Diagramme können, mit Grundformen verglichen, Aussagen über das Gebirgsverhalten liefern, z.B. ob eine vollkommen elastische Reaktion erfolgt, oder ob nach dem Druckversuch im Gestein Verformungen zurückbleiben (Kluftaufweitungen).

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Aus dem Verhältnis von eingepresster Wassermenge und Druck kann der  $k_f$ -Wert abgeleitet werden. Dazu sind eine Reihe von Lösungen entwickelt worden, die alle bestimmte Randbedingungen voraussetzen. Für den Kontinuumsansatz bei stationären Strömungsverhältnissen kann die Formel von THIEM verwendet werden. Bei der Annahme einer Kluftschar, die das Bohrloch senkrecht

schneidet hat der Arbeitskreis 19 (Versuchstechnik im Fels) eine spezielle Gleichung entwickelt. Daneben gibt es Verfahren für den stationären und instationären Fall beim Diskontinuumsansatz, oder Lösungen, die bei Klüften gleiche Öffnungsweiten und Rauigkeiten voraussetzen. Viele dieser Bedingungen sind nicht exakt zu bestimmen und können nur als Schätzwerte in die Formeln eingesetzt werden. Es ist deswegen wichtig zu wissen, welchen Einfluss diese unsicheren Parameter auf den zu errechnenden  $k_f$ -Wert haben. Bei vielen Lösungen wird die Reichweite des Versuchs gefordert, die ohne Beobachtungsbohrung nur geschätzt werden kann, oder es fließt die Länge der Verpressstrecke in den  $k_f$ -Wert ein, in der Annahme, dass eine homogene und isotrope radialsymmetrische Wassereinspeisung erfolgt. Bei Kluffleitern ist diese Bedingung aber oft nicht erfüllt. Werden z. B. bei der Formel von THIEM alle Eingabeparameter konstant gehalten und die Länge der Verpressstrecke variiert, kann der  $k_f$ -Wert um mehrere Größenordnungen schwanken. Im Einzelfall kann in einer abgepackerten Messstrecke nur eine Kluft für die gemessene Durchlässigkeit verantwortlich sein. Muss die Reichweite des Versuchs abgeschätzt werden, erhöht sich der errechnete  $k_f$ -Wert mit dem Anstieg der Reichweite. Im Extremfall, wenn eine sehr gut wasserleitende Einpresszone getestet wird, kann die Reichweite sehr hohe Werte ergeben. Wird das nicht erkannt und die Reichweite des Versuchs entsprechend zu niedrig angesetzt, kann der berechnete  $k_f$ -Wert zu niedrig ausfallen. Beide hier beschriebenen Effekte (Testintervall / wahre hydraulisch wirksame Zone, angenommene Reichweite / wahre Reichweite) können sich auch überlagern und zu unrealistischen Durchlässigkeitswerten führen.

Diese Unsicherheiten bei den WD-Test-Ergebnissen können minimiert werden, wenn zusätzliche Informationen über das Gebirge und die Wasserwegsamkeiten vorhanden sind. Wasserwegsame Zonen können z.B. mit dem Flowmeter oder durch Fluid-Logging in der Bohrung lokalisiert werden. Gezielt abgepackerte WD-Versuche können dann  $k_f$ -Werte für höher und niedriger durchlässige Gebirgsbereiche liefern, die Verglichen mit integralen Versuchen wie Langzeit-Pumpversuchen ein Durchlässigkeitsspektrum der gemessenen Gebirgseinheit ergeben. Die Auswertung kann z.B. nach HEITFELD (1965) oder RISSLER (1977) erfolgen.

Diese Überlegungen gelten prinzipiell für alle Packerversuche und sind hier nur beispielhaft für den WD-Test näher ausgeführt.

### **Druckerholungstest (Buildup test, Recovery)**

Messverfahren:

Nach einem Constant Head- bzw. Constant Flow-Test wird das Testintervall abgeschlossen (shut-in). Die gestörten hydraulischen Druckverteilungen in der Formation streben wieder nach den natürlichen Druckverhältnissen. Dieser zeitliche Druckausgleich wird registriert.

Auswerteverfahren und Untersuchungsziel:

Analytisch kann mit der Druckausgleichskurve der hydraulische Durchlässigkeitswert und das hydraulische Potential berechnet werden (HORNER 1951).

### **Messungen des stationären Zustands (Steady State)**

Messverfahren:

Der Druck und die Fließrate werden gemessen, wenn sich im Untersuchungsintervall wieder der Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Auswerteverfahren und Untersuchungsziel:

Die Transmissivität kann nach LOHMANN (1972) berechnet werden

### **Slug- und Bail-Test (als Packertest ausgeführt)**

Messverfahren:

Der Druck im Testintervall wird schlagartig verändert. Als Reaktion auf die Erhöhung oder Absenkung des Drucks setzt eine Fließphase ein um die Druckänderung wieder auszugleichen. Dabei wird die Wiedereinstellung des Ruhewasserspiegels im Testrohr eines abgepackten Bereichs gegen die Zeit aufgezeichnet (Abb. 3-2).

Slug-Auffülltest (Slug-Injection-Test): Schlagartiges Einfüllen eines definierten Wasservolumens oder das Eintauchen eines Verdrängungskörpers in das Testrohr.

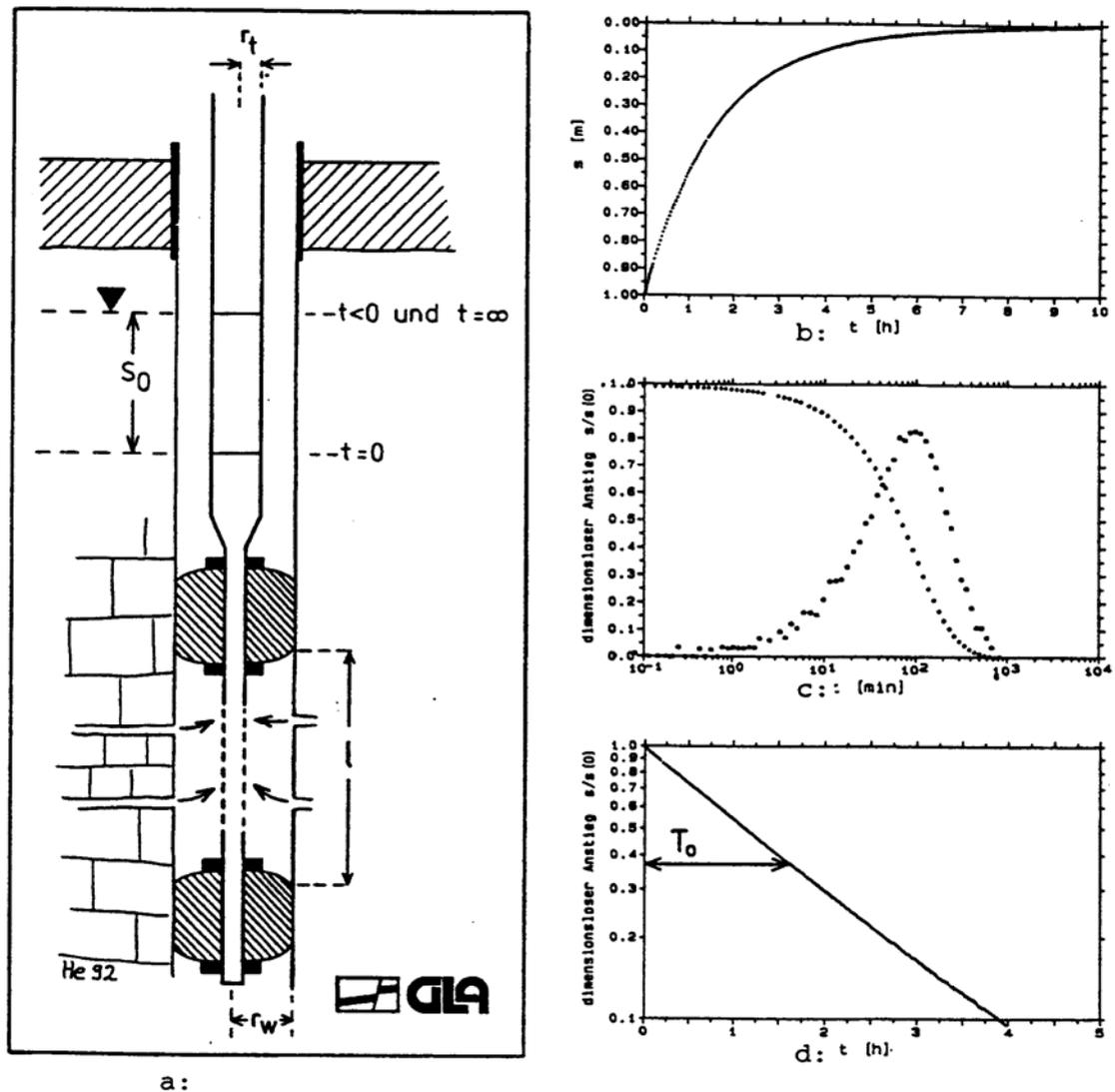
Slug-Absenktest (Slug-Withdrawal-Test, Bail-Test): Schlagartiges Abpumpen eines definierten Wasservolumens oder das Ziehen eines Verdrängungskörpers aus dem Testrohr.

Auswerteverfahren und Untersuchungsziel:

Geradlinienverfahren liefern nur Näherungslösungen für die Transmissivität, da das benötigte Verhältnis von Reichweite zu Brunnenradius nur abgeschätzt werden kann. Typkurvenverfahren beruhen dagegen auf exakten analytischen Lösungen. Bei der Angleichung der gemessenen Kurve mit der Typkurve kann es aber zu Fehlern kommen, da die Typkurven von idealtypischen Verhältnissen ausgehen. Bei Slug-Tests im Opalinuston ließen sich z.B. die Messkurven nur Typkurven anpassen, die unplausibel niedrigen Speicherkoeffizienten ( $< 10^{-20}$ ) entsprachen und damit zu hohe Transmissivitäten lieferten. Das Geradlinienverfahren nach HVORSLEV (1951) lieferte dagegen mit anderen Testarten gute Übereinstimmungen (HEKEL, 1992).

Weitere Geradlinienverfahren:

- Das Verfahren nach BOUWER & RICE (1976) basiert auf der Brunnenformel von THIEM (1906). Der  $k_f$ -Wert kann ermittelt werden, wenn die Reichweite des Versuchs mit empirischen Gleichungen bestimmt wurde.



Versuchsaufbau bei Slug-Tests. Diagramm b zeigt den linearen Druckverlauf bis zur Einstellung des Ruhewasserspiegels. Diagramm c zeigt den dimensionslosen Auftrag des Druckverlaufs gegen den Logarithmus der Zeit zur Auswertung mittels Typkurven nach COOPER et al., 1967. Diagramm d zeigt die Auftragung zur Auswertung mit dem Geradenverfahren (nach HVORSLEV, 1951).

Abb. 3-2 Versuchsaufbau bei Slug-Tests (aus HEKEL, 1992)

Weitere Geradlinienverfahren:

- Das Verfahren nach BOUWER & RICE (1976) basiert auf der Brunnenformel von THIEM (1906). Der  $k_f$ -Wert kann ermittelt werden, wenn die Reichweite des Versuchs mit empirischen Gleichungen bestimmt wurde.
- Das Verfahren nach NGUYEN & PINDER (1984) eignet sich auch für mittlere bis geringe Gesteinsdurchlässigkeiten. Der  $k_f$ -Wert und der spezifische Speicherkoeffizient  $S_s$  können bestimmt werden.

Beispiele für Typkurvenverfahren:

- Verfahren nach COOPER et al. (1967): 5 verschiedene Typkurven mit Speicherkoeffizienten von  $1e-1$  bis  $1e-5$  zur Ermittlung der Transmissivität bzw. des Speicherkoeffizienten.
- PAPADOPULUS et al (1973) entwickelten 5 weitere Typkurven für niedrigere Speicherkoeffizienten.
- Verfahren nach RAMEY et al. (1975): Brunnenspeicherung und Skin-Effekte können berücksichtigt werden wenn der Speicherkoeffizient bekannt ist. Anfangs- und Enddaten werden speziell betrachtet.
- Verfahren nach MATEEN (1983) und MATEEN & RAMEY (1984): Es wird von einem doppelt porösen Medium (Matrix und Klüfte) ausgegangen. Neben Transmissivität und Skin-Faktor kann auch das Verhältnis von Kluftspeichervermögen zum Gesamtspeichervermögen und ihr Durchlässigkeitsverhältnis bewertet werden. Das Verfahren stellt aber sehr hohe Ansprüche an die Messausrüstung.
- Das Verfahren nach FAUST & MERCER (1984) untersucht den Einfluss des Skins bei endlicher Skin-Zone. Ein negativer Skin (Durchlässigkeitserhöhung um das Bohrloch) hat kaum Auswirkungen auf Lage und Form der Typkurven und den daraus abgeleiteten Transmissivitäten. Beim positiven Skin (Verringerung der Durchlässigkeit um das Bohrloch) kommt es dagegen zu starken Veränderungen der Typkurven bzw. der Transmissivitäten.

Beispiele analytischer Verfahren:

- Verfahren nach NOVAKOWSKI (1989)
- Verfahren nach PERES et al (1989)

### **Pulse-Test**

Messverfahren:

Im Testintervall wird künstlich ein pulsartiger Über- oder Unterdruck erzeugt (Pulse Injection, Pulse Withdrawal). Dadurch kommt es zu einer Störung des hydraulischen Gleichgewichts im Aquifer,

dessen zeitlicher Ausgleich anschließend registriert wird. Je nach Durchlässigkeit des Gebirges wird eine Rückkehr in den Gleichgewichtszustand schnell oder langsam erfolgen. Verglichen mit Slug- und Bail-Tests erfolgt der Druckausgleich drei- oder viermal so schnell, allerdings mit erheblich geringere Eindringtiefe bzw. Reichweite der des Tests.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Durch Extrapolation und analytische Verfahren kann der Durchlässigkeitswert und das hydraulische Potential ermittelt werden z. B. nach BREDEHOEFT & PAPADOPULOS (1980). Ziel ist die Bestimmung geringer bis sehr geringer Durchlässigkeiten ( $k_f < 10^{-7}$  m/s) eines kleinen Bohrlochabschnittes in unmittelbarer Umgebung des Bohrlochs. Die Reichweite des Tests kann bei sehr geringen Durchlässigkeiten nur Millimeter betragen.

Wenn die Bohrlochfluide eine andere Temperatur als die Formationsfluide haben, kann es bei Pulse-Tests zu Druckvariationen kommen. Sie sind eine Funktion des Expansionskoeffizienten der Fluide, der wesentlich von der Temperatur und untergeordnet vom Druck bestimmt wird. Bei konstantem Druck berechnet sich der Expansionskoeffizient von reinem Wasser wie folgt:

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\Delta V}{\Delta T} \right) p$$

$\beta$  = thermischer Expansionskoeffizient ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\Delta T$  = Temperaturänderung ( $^{\circ}\text{C}$ )

$V$  = Volumen ( $\text{m}^3$ )

$p$  = Druck const.

$\Delta V$  = Volumenänderung ( $\text{m}^3$ )

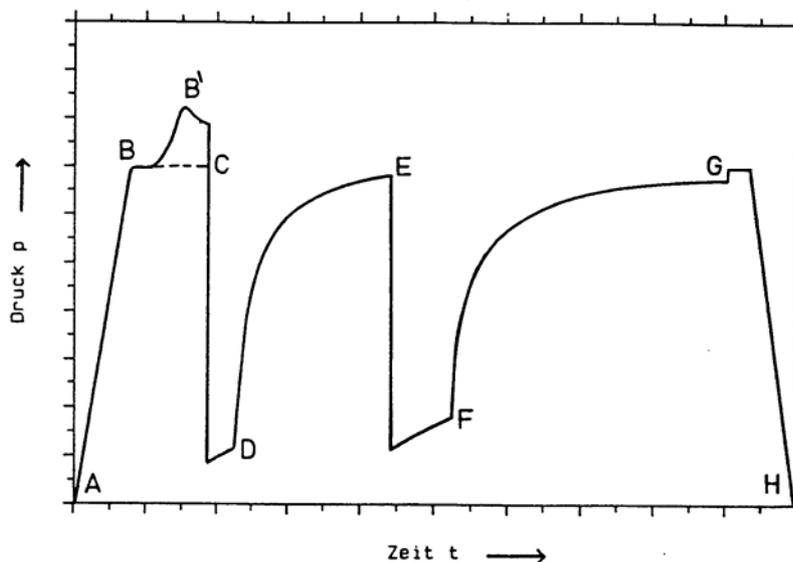
Bei Temperaturunterschieden von  $0^{\circ}$  bis  $100^{\circ}\text{C}$  variiert der Expansionskoeffizient zwischen  $-3,9\text{E-}5$  bis  $7,5\text{E-}4$ . Korrekturen von Testdaten mit dem Expansionskoeffizienten werden nur notwendig, wenn der Temperaturunterschied bei der Druckaufbauphase  $0,2$  bis  $0,3^{\circ}\text{C}$  übersteigt (BELANGER 1989).

### Drill-Stem-Test (Gestängetest, Schließdrucktest)

Messverfahren:

In einem unverfilterten Bohrloch wird eine Packerstrecke über ein hohles Gestänge mit der Erdoberfläche verbunden. Die Rohrtour kann durch eine Ventil vom Testabschnitt abgetrennt werden. Bei geöffnetem Ventil herrscht atmosphärischer Druck im Testabschnitt und gegenüber dem hydrostatischen Druck im Gestein besteht ein Unterdruck, so dass Wasser aus der Umgebung dem Packerabschnitt zufließt (Flow). Wird das Ventil geschlossen (shut-in), baut sich wieder ein Druck auf, der dem Formationsdruck entspricht (Build up). Das wechselweise Öffnen und Schließen des Ventils erlaubt die Registrierung des Fließ- und Schließdrucks mittels Druckmessgeräten im Test-

abschnitt. Druckverlauf gegen die Zeit aufgetragen ergibt abwechselnde Druckanstiege und Druckentlastungen (Abb. 3-3). In der Flow-Periode entspricht der Test dem Slug Withdrawal-Test nach dem shut in in der Build up-Phase dem Druckerholungstest. Wenn bei einem Slug Withdrawal-Test kein statischer Gleichgewichtsdruck erreicht werden kann (full recovery), besteht die Möglichkeit nach dem schließen des Ventils (shut in) die Druckerholung zu messen und den Test als DST auszuwerten.



Schematischer Druckverlauf bei einem Drill-Stem-Test.

- A-B: Einbau des Teststrangs.
- B-C: Setzen der Packer (B-B'-C: relativ undurchlässiges Gebirge).
- C : Öffnen des Testventils.
- C-D: 1. Fließphase.
- D : Schließen des Testventils.
- D-E: 1. Schließphase.
- E : Öffnen des Testventils.
- E-F: 2. Fließphase.
- F : Schließen des Testventils.
- F-G: 2. Schließphase.
- G-H: Ausbau des Teststrangs.

Abb. 3-3 Druckverlauf bei einem Drill-Stem-Test aus HEKEL (1992)

Untersuchungsziel:

Bestimmung von mittleren bis kleineren Gebirgstransmissivitäten ( $10^{-5} - 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Auswerteverfahren:

Bei der Auswertung der DST-Tests wird zwischen Fließ- und Schließphase unterschieden:

Auswertung der Fließphase (flow-period):

Fließphasen mit einem mindestens 1/3 umfassenden Druckanstieg können als Slug-Test ausgewertet werden. Ansonsten kann näherungsweise ein Verfahren nach HVORSLEV (1951) eingesetzt werden.

Auswertung der Schließphase (shut-in):

Auswertung nach HORNER (1951), ihm entspricht das Wiederanstiegsverfahren von THEIS (1956) und wird mit Typkurven ausgewertet.

Das Verfahren nach PERES et al. (1989) erfordert keine Typkurven. Entwickelt wurde es zur Auswertung von Bail-Tests.

Das Verfahren nach RAMEY et al. (1975) ist ein Typkurvenverfahren, wo neben der Transmissivität auch der Skin-Effekt bestimmt werden kann.

### **Pumptest**

Messverfahren:

Mittels einer Pumpe wird eine konstante Wassermenge dem Bohrloch, der Packerstrecke oder dem Brunnen entnommen. Der Versuch wird gefahren, bis eine einigermaßen konstant bleibende Absenkung erreicht wird. Bei geringen Durchlässigkeiten stellt der Versuch hohe Anforderungen an die technische Ausrüstung, besonders an die Pumpe. Eine zu hohe Pumprate kann zum Trockenfallen der Kluftzuflüsse und der Pumpe führen. Eine zu geringe Pumprate führt zu einer zu kleinen Reaktion des Aquifers. Für die Pumpdauer gilt das Entsprechende wie beim Langzeitpumpversuch angegeben.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Ausgewertet kann die Absenkung während der Pumpphase (drawdown period) und der Wiederanstieg nach Abstellen der Pumpe (recovery period). Bei geringen Durchlässigkeiten ( $< 5 \cdot 10^{-7}$  m/s) müssen so geringe Pumpratzen gefahren werden, dass die technisch bedingten Ratenchwankungen größer als die Pumprate werden und eine Versuchsauswertung nicht mehr sinnvoll ist (HEKEL, 1992).

### **Squeeze-Test**

Messverfahren:

Beim Squeeze-Test wird der Doppelpacker-Teststrang mit geschlossenem Testventil in das Bohrloch eingebaut. Beim Aufblasen der Packer wird ein Abschnitt im Bohrloch eingeschlossen. Die Volumenausdehnung der Packer bewirkt einen Druckanstieg im eingeschlossenen Bohrlochabschnitt. Gemessen wird dann der Druckabfall im Testintervall.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Der Squeeze-Test wird zur schnellen Abschätzung der Durchlässigkeit im Packerabschnitt eingesetzt. Die Auswertung kann graphisch nach HVORSLEV (1951) erfolgen.

### **Packer-Flowmeter-Logging**

Messverfahren:

Die Messausrüstung besteht aus einem Propeller-Flowmeter und einem Packer mit zylindrischem Innenrohr. Der Zufluss in das Packerintervall wird so durch das Innenrohr mit kleinem Durchmesser gezwungen. Dadurch wird die Ansprechschwelle des Flowmeters erniedrigt auf ca. 0,2-0,3 l/min.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Zuflussraten können sehr tiefenpräzise bestimmt werden. Bei Pump- bzw. Injektionsraten  $> 5$  l/min oder  $T$  ( $m^2/s$ ) zwischen  $5E-3$  bis  $1E-7$  einsetzbar. Die Auswertung kann z.B. mit dem Programm KPFLOW (HUFSCHMIED 1983, THOMPSON 1990) erfolgen (AMMANN, 1993).

### **Doppelmantelpacker mit geoelektrischer Messtechnik**

Messverfahren:

In einem abgepackerten Bohrlochintervall wird ein gut leitfähiger Tracer in die Gesteinsformation gepresst. Die Tracerausbreitung wird durch geoelektrische Sensoren an der Außenhaut des Doppelpackers beobachtet. Sie registrieren induktiv die Veränderung der injizierten Tracerwolke. Nach erfolgter Injektion wird die gut elektrisch leitfähige Tracerwolke durch die natürliche Grundwasserströmung an der Bohrung vorbeibewegt. Auch dieser Vorgang wird durch geoelektrische Messungen aufgezeichnet.

Untersuchungsziel:

Wesentliches Ziel des Versuches ist die Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit des ungestörten Grundwasserleiters. Daneben können auch der  $k_f$ -Wert, der spezifische Speicherkoeffizient, hydraulische Diffusionskonstante, Porosität, Dispersionslänge und der Rückhaltekoefizient bestimmt werden. In unverrohrten oder mit Kunststoffrohren verrohrten Bohrungen kann Einfallen und Streichen hydraulisch wirksamer Strukturen ermittelt werden (KESSELS & ZOTH, 1999, FULDA et al., 1999).

### **3.5.1.3 Weitere hydraulische Bohrlochversuche**

Die folgenden Versuche werden seltener bei der Untersuchung von gering durchlässigem Gebirge durchgeführt.

**Auffüll-, Hebungs- oder Abpressversuch**

Messverfahren:

In einem ausgebautem oder offenem Bohrloch wird über einem Wasserzähler eine über die Zeit konstante Menge Wasser eingeleitet. Nach Erreichen einer gleichbleibenden Wasserspiegelaufhöhung wird diese einige Zeit beibehalten. Die Wasserspiegelaufhöhung und die eingeleitete Menge Wasser werden ausgewertet.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Mit dieser Methode kann die Transmissivität, der Speicherkoeffizient und der Skin-Faktor des Brunnens ermittelt werden. Ein negativer Skin-Faktor charakterisiert Brunnen, die z.B. gesäuert wurden, oder von einem Kluftsystem durchzogen werden, d.h. hydraulisch gut angeschlossen sind. Ein positiver Skin-Faktor charakterisiert Brunnen, dessen Gebirgsdurchlässigkeit in Bohrlochnähe geringer ist als in weiterer Entfernung vom Brunnen (SCHÄDEL & STÖBER 1984). Die Auswertung wird mit Hilfe von Typkurven vorgenommen. Die Methode ist besonders bei mittleren Gebirgsdurchlässigkeiten anwendbar.

**Einschwingversuch**

Messverfahren

Durch Pressluft wird in einem nach oben abgedichtetem Bohrloch der Grundwasserspiegel abgesenkt. Nach Druckentlastung wird die einsetzende gedämpfte Schwingung der Wassersäule im Bohrloch über einen Messwertaufnehmer registriert und aufgezeichnet.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Der gespannte Grundwasserleiter wird als schwingfähiges System betrachtet. Amplitude, Frequenz und Dämpfung der Schwingung hängen von der Transmissivität und der Wasserspiegellage des Aquifers ab. Aus der aufgezeichneten Schwingungskurve wird die Eigenfrequenz und der Dämpfungskoeffizient des Systems Brunnen-Aquifer ermittelt. Je größer der Dämpfungskoeffizient und je kleiner die Eigenfrequenz des Systems, desto geringer ist die Transmissivität des Aquifers in der Umgebung des Bohrlochs. Die Ermittlung von Aquiferparametern beruht auf der Modellvorstellung für einen homogenen und isotropen Aquifer. Die Methode ist in ausgebauten Bohrlöchern (Brunnen, Messstelle) anwendbar und für gespannte Grundwasserleiter mit  $k_f$ -Werten zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-7}$  m/s geeignet. Reichweite wenige 10er Meter. MÜLLER (1984) vergleicht die aus dem Einschwingverfahren gewonnenen  $k_f$ -Werte an Porengrundwasserleitern mit anderen Methoden (Pumpversuche, Siebanalysen). Dabei ergaben die Einschwingergebnisse sehr gute Übereinstimmungen auch bei ungespannten Grundwasserleitern. Technischer Aufwand (Packer, Pressluftflasche, Drucksensor und Aufzeichnungseinheit) und Kostenaufwand sind gering. Bisher gibt es nur begrenzte praktische Erfahrungen mit dieser Methode.

### **Hydraulischer Impedanztest**

Messverfahren:

Das Verfahren ist mit dem Einschwingversuch vergleichbar. Dabei wird mit Pressluft in einem nach oben abgesperrten Bohrloch Luft eingepresst. Mit zwei Druckaufnehmern wird der zeitliche Verlauf der Druckstörung und der Aquiferstörung im Bohrloch gemessen. An technischer Ausrüstung werden ein oder mehrere Bohrlochpacker, eine Pressluftereinrichtung, 2 Druckaufnehmer und eine analoge Registriereinrichtung der Druckstörung und der Aquiferstörung benötigt.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit einem spektralen Auswerteverfahren, dem Programm HyFit (MARSCHALL 1993). Damit können lokale Transmissivitäten abgeleitet werden. Die Methode wurde auch an gering durchlässigen Kluftgrundwasserleitern getestet (MARSCHALL & BARCZEWSKI 1990). Das Verfahren ist besonders auch für tiefe Grundwasser-Messstellen geeignet.

### **Gezeitenverfahren**

Messverfahren:

Durch die Anziehungskraft von Mond und Sonne wird der Erdkörper elastisch verformt. Besonders in gespannten Aquiferen führt das zu einer Verkleinerung bzw. Vergrößerung wasserführender Hohlräume. Dadurch steigt oder fällt der Wasserstand im Bohrloch um einige Zentimeter bis Dezimeter.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Da sehr große Bereiche des Grundwasserleiters auf die Gezeiten reagieren werden als Ergebnis für die hydraulischen Parameter nur sehr schwer zuordbare Mittelwerte erhalten (STOBER 1993).

### **Luftdruckmessungen**

Messverfahren:

Luftdruckänderungen bewirken Schwankungen des Grundwasserdruckspiegels. Wird der Luftdruck gleichzeitig mit Druckspiegelmessungen aufgezeichnet kann daraus der spezifische Speicherkoeffizient berechnet werden. Die Messung kann auch bei Pumpversuchen durchgeführt werden, wenn eine stationäre Spiegelabsenkung erreicht wird. Je nach Änderung des Luftdrucks kann der Grundwasserspiegel sich um mehrere dm absenken oder anheben. Das Verfahren ist nur bei gespannten Grundwasservorkommen einsetzbar.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Das Verhältnis der Druckschwankung im Grundwasser zur Luftdruckschwankung wird als barometrischer Koeffizient  $B_p$  bezeichnet. Damit kann der spezifische Speicherkoeffizient nach einer Formel von JACOB (1940) berechnet werden. In der Praxis wird dieses Verfahren vorwiegend bei Po-

rengrundwasserleitern in Lockergesteinen eingesetzt. Seine Anwendbarkeit auf Festgesteinsaquifere ist unsicher.

### **3.5.1.4 Ventilationsversuch**

Messverfahren:

Bei einem Ventilationstest wird ein untertägiger Stollenabschnitt abgeschottet. Eine Klimaanlage bläst trockene Luft in diesen Bereich und saugt feuchte Luft ab. Mit einem Wasserabscheider kann der Wasserzufluss aus den Stollenwandungen in den Stollenhohlraum bestimmt werden (Abb.3-4). Mit dieser Versuchsanordnung sollen die großräumigen hydraulischen Verhältnisse des Gebirges untersucht werden. Um die Makropermeabilität zu bestimmen, muss mit zusätzlichen Bohrungen der hydraulische Gradient in der Stollenumgebung bestimmt werden. Einzelne stark schüttende Kluftsysteme können die Gesamtpermeabilität dominieren. Sie werden gesondert gemessen und ausgewertet (KULL, BREWITZ, KLARR, 1993). Danach eignen sich möglichst homogene Gebirgsbereiche mit geringer Durchlässigkeit für dieses Verfahren.

Das Einflussvolumen ist bei einem Ventilations-Versuch sehr viel größer als bei Packerversuchen in einem Bohrloch. Bei Hydraulische Bohrlochtests beträgt der Einflussbereich meist nur wenige  $m^3$ , dagegen können bei einem Ventilationsversuch 100 000  $m^3$  und mehr erreicht werden (LONG et al, 1981).

Versuchsauswertung:

Der Durchlässigkeitsbeiwert kann analytisch mit der Brunnenformel von THIEM (1870) berechnet werden. Dabei werden quasi-stationäre Fließverhältnisse in einem gespannten Aquifer angenommen und mit den Fließeigenschaften eines porösen Mediums gleichgesetzt. Mit einer numerischen Simulation lassen sich auch ein Mehrphasenfluss in einem dualen Porenraumsystem (Matrix/Kluft) modellieren.

## **3.5.2 Tracer-Methoden**

### **3.5.2.1 Elektrolytischer Tracer (NaCl, MgCl<sub>2</sub>)**

Messverfahren:

Der Tracerstoff wird in einen oberstromigen Pegel oder Schwinde eingegeben. Im Brunnen werden Widerstandsmessungen durchgeführt. Dabei wird die Zunahme der Ionenkonzentration von Grundwasserzutritten in der Zeit gemessen. Möglich ist auch die Messung der Verdünnung im Eingabepegel.

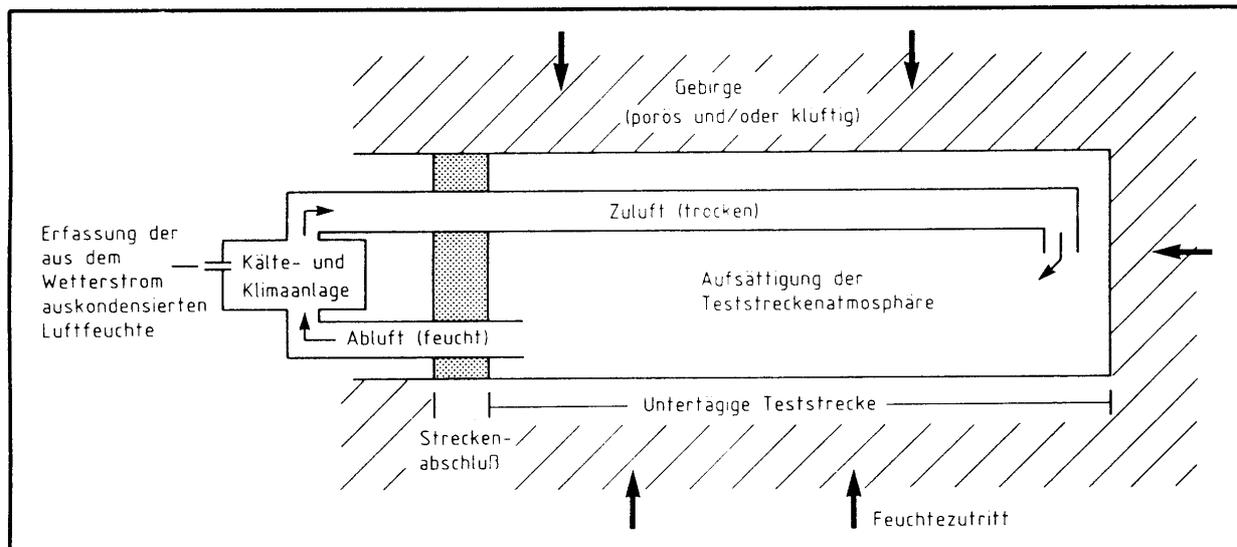


Abb. 3-4 Schemazeichnung der Funktionsweise des Ventilationstestverfahrens aus KULL et al. (1993)

Tracerversuche können auch als Mehrbohrlochversuche ausgeführt werden. Dabei wird in einer Bohrung Salzwasser mit Druck injiziert und in benachbarten Bohrungen mit elektrischen Leitfähigkeitsfühlern die Ankunft des Tracers aufgezeichnet. Im Felslabor Grimsel (Schweiz) konnten damit Transportgeschwindigkeiten (Abstandsgeschwindigkeiten) von ca. 1 m/d ermittelt werden (LIEDKE et al., 1999).

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Aus der Widerstandsverteilung im Grundwasser mit der Zeit kann die Abstandsgeschwindigkeit zwischen Pegel und Brunnen berechnet werden. Abstandsgeschwindigkeiten implizieren eine direkte Verbindung zwischen Eingabestelle und Messstelle. In einem Kluftnetzwerk sind aber auch längere Wege möglich, die Abstandsgeschwindigkeit wäre dann zu niedrig.

Aus der Durchgangskurve der Tracers an der Messstelle können verschiedene Arten von Abstandsgeschwindigkeiten berechnet werden, etwa beim Ersteinsatz des Tracers (maximale Abstandsgeschwindigkeit), beim Maximalwert der Tracerkonzentration (dominante Abstandsgeschwindigkeit) oder der Zeitpunkt des Median-Wertes der Tracerkonzentration (Median-Geschwindigkeit). Die wirkliche Abstandsgeschwindigkeit liegt dabei nach KÄSS (1992) meist in der Mitte zwischen der Zeit der Maximal-Konzentration und der Zeit, die der Median-Geschwindigkeit entspricht.

Neben den Anstandsgeschwindigkeiten können aus den Durchgangskurven auch Dispersionskoeffizienten berechnet werden.

### **3.5.2.2 Sporendrift, Mikropartikel**

Messverfahren:

Lycopodiumsporen (Bärlappsporen) werden mit bis zu fünf verschiedene Farben eingefärbt. Damit können verschiedene Schwinden mit unterschiedlich gefärbten Sporen gleichzeitig als Eingabestellen verwendet werden. Durch ihre Dichte von 1,1 bleiben die Sporen lange in der Schwebelage. Ihre Größe beträgt ca. 33 Mikron. Das Auffangen der Sporen erfolgt mit einem Planktonnetz, das in der Regel täglich gelehrt werden muss. Die Auswertung wird mikroskopisch durch Auszählen vorgenommen.

Mikropartikel wie Polystyrol-Kügelchen stehen in Größen von 0,05 bis 90 Mikron zur Verfügung. Sie sind mit Fluoreszenzfarben eingefärbt und können wie eingefärbte Sporen eingesetzt werden.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Die Vorteile des Verfahrens sind seine Ungefährlichkeit, es beeinträchtigt weder die Wasserqualität noch das Aussehen des Wassers, und die Möglichkeit aufgrund der Sporenfarben verschiedene Schwinden auseinanderhalten zu können. Die Nachteile sind, dass nur qualitative Aussagen über die Fließwege und Fließgeschwindigkeiten getroffen werden können.

Die Sporen- bzw. Partikelgröße begrenzt die Drift auf offene Klüfte mit einer Mindestöffnungsweite und Karsthohlräume. Porenaquifere (außer sandfreie grobe Kiese) und die Bodenkrume seien die Sporen ab (ZÖTL, 1974).

### **3.5.2.3 Aktivierungsanalytisches Tracerverfahren**

Messverfahren

Für die Eingabe in die Schwinde wird dem versickernden Wasser eine nicht radioaktive Substanz zugemischt und erst die gezogenen Wasserproben zur Aktivierung des Elements im Reaktor unter Neutronenbeschuss gesetzt. Als Tracerstoffe kommen Brom als Ammonbromid ( $\text{NH}_4\text{Br}$ ), Lanthan oder Indium in Frage. Bei Indium kann mit einer Tracermenge im Bereich von mehreren 100 g gerechnet werden (ZÖTL, 1974).

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Verwendung von ungiftigen nicht radioaktiven Stoffen, die nur in relativ kleinen Mengen eingesetzt werden müssen. Dadurch sind während der Versuchs-

durchführung keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen erforderlich. Die Auswertung erfolgt wie bei den anderen Tracer-Verfahren durch ein Konzentrations- / Zeit-Diagramm. Damit kann zwischen dem Ort der Tracereingabe und dem Ort der Tracermessung die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers bestimmt werden.

### **3.5.2.4 Einbohrlochverdünnungsmethode mit radioaktiven Tracern**

Messverfahren:

In einem durch Packer abgesperrten Bohrlochbereich wird die Konzentrationsabnahme eines zuvor zugefügten Tracers gemessen.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel

Aus der zeitlichen Konzentrationsabnahme im Packerintervall kann eine Verdünnungsgeschwindigkeit abgeleitet werden. Die Verdünnungsgeschwindigkeit steht in einem empirischen Zusammenhang mit der herrschenden Filtergeschwindigkeit. Entsprechend des Bohrlochausbaues (Filterrohrtyp, Schlitzweite usw.) müssen Korrekturen der Messergebnisse durchgeführt werden.

Wird als Tracer radioaktives Material verwendet kann die horizontale Grundwasserfließrichtung ermittelt werden, indem nach dem Abströmen des Tracers in den Grundwasserleiter die radioaktive Strahlung durch eine winkelabhängige Detektion ermittelt werden kann. Radioaktive Tracer sind aber bei Trinkwasserfassungen problematisch, evtl. könnten Radionuklide mit kurzen Halbwertszeiten verwendet werden. Eine, vom GSF-Institut für Radiohydrometrie in München-Neuherenberg entwickelte, Tracersonde verwendet das radioaktive Isotop Brom-82 in  $\text{NH}_4\text{Br}$ -Lösung in der Konzentration von  $10^{-7} \text{ mol/m}^3$ . Brom-82 hat eine Halbwertszeit von 35,3 h. Die dabei entstehende radioaktive Strahlung soll vom Strahlenschutz her unbedenklich sein (DROST, 1984).

Mit der Sonde können Bereiche von 0,5 m im Filterrohr abgepackert werden. Nach der Tracerinjektion wird ein Tracerverdünnungsdiagramm zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit und anschließend ein Tracerverteilungsdiagramm durch Detektorrotation aufgenommen. Die Sonde kann in Metall- und Kunststoffrohren mit Durchmesser von 3 - 8 Zoll eingesetzt werden. Eine ebenfalls mit Brom-82 arbeitende Sonde ermöglicht die Messung von vertikalen Filtergeschwindigkeiten (Flowmeter logging, DROST 1986).

Die Methoden wurden bisher vorwiegend in Lockergesteinsaquiferen eingesetzt. Eine spezielle Tracersonde wurde jedoch für die Messung der Kluftwasserströmung in geeigneten Bohrungen konstruiert. Ein verstellbarer Packer erlaubt die Anpassung an die Kluftgeometrie (DROST et al 1989).

### **3.5.2.5 Einbohrlochverdünnungsmethode mit Uranin als Tracer**

Messverfahren:

Das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (MARSCHALL 1993) hat ein Lichtleiterfluorometer zur In-situ-Konzentrationsmessung entwickelt. Dadurch können auch Fluoreszenzfarbstoffe wie Uranin eingesetzt werden. Die Nachweisgrenze bei diesen Stoffen liegt sehr viel niedriger ( $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  mg/l) als bei Leitfähigkeitsmessungen mit NaCl-Tracern (0,1 - 1 mg/l). Damit kann noch eine horizontale Filtergeschwindigkeit von  $10^{-7}$  m/s gemessen werden.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Wie bei der Verwendung von radioaktiven Tracern können mit Uranin-Tracern horizontale Filtergeschwindigkeiten und Kluftwasserströmungen bis hinunter zu  $10^{-7}$  m/s gemessen werden. Die Strömungsrichtung kann dagegen nicht erkannt werden.

### **3.5.3 Bohrlochlogging-Methoden**

Bohrlochlogging unterscheidet sich von Versuchen die Bohrlochabschnitte oder das Bohrloch insgesamt untersuchen. Beim Logging werden kontinuierliche Messungen mit einer Sonde durchgeführt, die mit gleichbleibender Geschwindigkeit im Bohrloch auf- oder abbewegt wird. Daraus resultieren Messwert/Tiefen-Kurven, die direkt mit der Bohrlochsäule korreliert werden können. Mehrere Loggings mit unterschiedlichen Sonden verstärken die Aussagesicherheit.

#### **3.5.3.1 Mechanische Methoden**

##### **Kaliberlog**

Messverfahren:

Eine mit Federarmen ausgestattete Sonde tastet die Bohrlochwand ab. Die Spreizung der Federarme wird dabei mit der Tiefe bei aufziehender Sonde kontinuierlich registriert. Dreiarmige oder vierarmige Kalibersonden können einen richtungsorientierten dreidimensionalen „Abdruck“ der Bohrlochinnenwand liefern.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Mit dem Kaliberlog können weiche von harten Gesteinsabschnitten in ihrer Resistenz gegenüber dem Bohrmeißel erkannt werden. Wasserwegsame Bereiche werden dabei nicht direkt erkannt, oft sind die weichen Gesteinsbereiche als tonreichere Partien besonders undurchlässig. Wo dies auszuschließen ist, können aber auch Kluftzonen ein stärkeres Ausbrechen der Bohrlochwand verursachen.

Kaliberdaten werden hauptsächlich dazu verwendet den Einfluss des Bohrloches auf andere Messungen korrigieren zu können (Bohrlochkorrektur) z. B. bei der Berechnung der Brunnenspeicherung.

### **Propellerflowmeter**

Messverfahren:

Bei Standardverfahren mit dem Propellerflowmeter wird die Umdrehungszahl eines Flügel-Impellers gemessen. Dieser wird in der Bohrung mit konstanter Geschwindigkeit entgegen dem, durch eine Pumpe erzeugten, Förderstrom bewegt. Das Verfahren eignet sich aber nur für höhere Zuflussraten (ab 10 mm/s vertikale Strömung). Für geringe Zu- und Abflüsse bis hinunter zu vertikalen Geschwindigkeitsunterschieden von 0,2 mm/s werden im Kapitel thermische Methoden zwei modifizierte Verfahren beschrieben.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Flowmetermessungen liefern Aussagen über Zufluss- bzw. Abflusszonen von Grundwasser innerhalb der Bohrsäule. Dabei kann meist Tiefe, Mächtigkeit und die Zufluss- bzw. Abflussmenge relativ zur Gesamtförderung ermittelt werden. Die aktiven Zuflusszonen sind die eigentlichen produktiven Aquiferbereiche der durchörterten Gesteinsabfolge. Oft ist bei Wasserbohrungen im Festgestein zu beobachten, dass große Mächtigkeiten an potentiellen Grundwasserleitern erbohrt werden, nachfolgende Flowmetermessungen zeigen aber, dass nur ein geringer Prozentsatz davon nennenswerte Zuflüsse in das Bohrloch abgeben. Werden nun bei Pumpversuchen, die das gesamte Bohrloch betreffen Transmissivitäten und mit der Gesamtmächtigkeit  $k_f$ -Werte berechnet, ergeben sich für die Zuflusszonen zu niedrige und für die übrigen Zonen zu hohe Werte. Können dagegen mit Flowmetermessungen die Zuflüsse lokalisiert und in ihrer Mächtigkeit abgeschätzt werden lassen sich  $k_f$ -Werte angeben, die nur die Zuflussbereiche betreffen, während die übrigen Zonen vernachlässigbar für die Brunnenleistung sind.

Diese Vorgehensweise ist aber nur in mittel bis gut durchlässigen Kluftaquiferen möglich. Bei geringen bis sehr geringen Permeabilitäten sind vergleichbare Verfahren wie das weiter unten beschriebene Fluid-Logging in Verbindung mit hydraulischen Packer-Tests besser geeignet.

## **3.5.3.2 Thermische Methoden**

### **Thermisches Flowmeter**

Messverfahren:

Das thermische Flowmeter des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart (MARSCHALL 1993) beruht auf der Funktionsweise eines Hitzedraht-Heißfilmanometers. Dabei wird die Wärmeabgabe des Messfühlers registriert, der gegenüber dem ihm umgebenden Medium um eine be-

stimmte Temperaturdifferenz aufgeheizt ist. Die abgegebene Wärmeleistung ist u.a. abhängig von der Geschwindigkeit eines Strömenden Mediums (Wasser). Da der Zusammenhang zwischen Anströmgeschwindigkeit und Wärmeabfuhr nicht linear ist, muss der Sensor unter definierten Strömungsbedingungen geeicht werden.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Das Verfahren eignet sich besonders für kleine vertikale Strömungsgeschwindigkeiten bis hinunter zu 2 mm/s und kann Temperaturunterschiede bis kleiner 3 Kelvin erfassen.

### **Heat-Pulse Flowmeter**

Messverfahren:

Ein Heizdraht wird eine Millisekunde lang erhitzt. Dabei wird das Wasser in der unmittelbaren Umgebung des Drahtes erwärmt. Über und unter dem Heizdraht registrieren in einer bestimmten Entfernung zwei Sensoren die Wassertemperatur. Bei einer vorhandenen vertikalen Wasserströmung können so Zeit und Temperaturanstieg der durch den Hitzeimpuls erwärmten Wasserteilchen bestimmt werden. Der Temperaturunterschied ist dabei um etwa 0,1 Grad Celsius größer als die normale Temperatur des Wassers an dieser Stelle im Bohrloch. Die Sonde kann als Seilwinden-Flowmeter oder als Packerflowmeter für bestimmte Bohrlochabschnitte eingesetzt werden. Die Messung kann mit Entnahmemengen zwischen 0,05 - 0,35 l/s durchgeführt werden. Damit sind kleinere Pumpraten als bei Propellerflowmetern möglich und es können auch 2" Pumpen eingesetzt werden. Die Sonde ist 1,16 m lang mit einem Durchmesser von 44 mm.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Das Heat-Pulse-Flowmeter ist besonders für die Messung von geringen vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten im Bohrloch geeignet. Der Messbereich liegt bei 0,06 bis über 6 m/min. Dabei kann zwischen ab- und aufsteigenden Strömungen unterschieden werden. Geschwindigkeitsunterschiede von 0,01 m/min. können noch erkannt werden. Die gemessenen Geschwindigkeiten hängen auch von der Viskosität des Wassers ab und damit von seiner Temperatur. Auch die Messung selbst, durch den Hitzeimpuls, verändert die Fließgeschwindigkeit. Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten können sich thermische Konvektionszellen im Bohrloch ausbilden. Sie entstehen aufgrund der Temperaturunterschiede von Bohrlochwand und Wassersäule im Bohrloch. Sogar kleine Temperaturgradienten im Bohrloch von 1 Grad Celsius pro 1000 m können Strömungen in der Bohrlochwassersäule verursachen. Durch Korrekturen und Kalibrierungen müssen diese Fehlerquellen beseitigt werden. Die Messsonde ist eine Entwicklung des U. S. Geological Surveys und wurde erfolgreich eingesetzt um in Bohrungen vertikale Strömungsgeschwindigkeiten und wasser-schüttende Klüfte in Granit zu identifizieren (Lac du Bonnet, Manitoba, Kanada). Die Messungen erfolgten zur Errichtung eines Felslabors zur Erkundung von Endlagerstandorten von radioaktivem Abfall (HESS, 1984).

### **Temperatur-Log**

Messverfahren:

Mit einem elektrischen Widerstandsthermometer wird die Temperatur im Bohrloch in Abhängigkeit von der Tiefe registriert. Die Messung erfolgt während des Einfahrens der Sonde in das Bohrloch. Mit der Sonde können noch Temperaturschwankungen von 0,01 Grad Celsius registriert werden (REPSOLD 1989). Wegen der jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen ist eine Messung erst in einer Tiefe ab 20 m sinnvoll.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Zuflüsse ins Bohrloch zeigen bei der Messung einen Temperaturanstieg auf dem Log. Je geringer die Zu- oder Abflüsse, desto mehr nähert sich die Temperaturkurve dem Verlauf der geothermischen Temperaturzunahme. Mit dem Temperaturlog können Wasserzu- oder -abflüsse erkannt werden. Zuflusshorizonte und auch die relativen Zuflussstärken sind ableitbar.

Mit einer Kombination aus Temperaturmessung und Injektionstest konnten an der Vorbohrung im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms zwischen 480 und 4000m unter Gelände 30 wasseraufnehmende Klüfte und Kluftzonen erkannt werden (JOBMANN, 1990). Bei diesem Verfahren, werden vor während und nach einem Injektionstest Temperaturlogs gefahren. Die Temperaturmessung wurde mit einer NLfB-Temperatursonde durchgeführt, die eine Auflösung von  $\pm 0,002$  K besitzt (ZOTH & FESCHE, 1985).

### **3.5.3.3 Radioaktive Methoden**

#### **Gamma Ray**

Messverfahren:

Die natürliche Gammastrahlung wird durch das Isotop K-40 und von den radioaktiven Isotopen der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen erzeugt. Die Gammastrahlung wird mit einem Szintillationszähler gemessen und als Impulse/Sekunde aufgezeichnet.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Da die erwähnten radioaktiven Elemente besonders in Tonmineralien auftreten, zeigt das Gamma-Ray-Log die Lage von Gesteinsschichten mit erhöhtem Tonmineralgehalt. Glaukonit und Glimmer in Sandsteinen können ebenfalls eine erhöhte Gammastrahlung erzeugen. Bei bekannten tonigen Schichten kann der Tongehalt abgeschätzt werden. Uranerze verursachen charakteristische Diagramm-Peaks. Schichten bis hinunter zu einer Mächtigkeit von 0,3 m können unterschieden werden.

## Density-Sonde

Messverfahren:

Die Gamma-Gamma-Sonde arbeitet mit einer künstlichen Gamma-Quelle und einem Gammadektektor. Die ausgesandten Gammastrahlen werden an den Elektronenhüllen der Gesteinsatome gestreut und je nach deren Dichte mehr oder weniger absorbiert. Bei einem konstanten Verhältnis von Elektronen- zur Kernmassenzahl kann aus der Elektronendichte auf die Materialdichte geschlossen werden.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Das Gamma-Gamma-Log liefert die Gesamtdichte (Matrixdichte + Dichte der Porenflüssigkeit). Bei bekannter Matrixdichte (z.B. bei sandigem Porenaquifer  $2,65 \text{ g/m}^3$ ) und bekannter Dichte der Porenflüssigkeit ( $1,0 \text{ g/cm}^3$  für Wasser) kann das Gesamtporenvolumen (Gesamtporosität) bestimmt werden. Dadurch ist die Unterscheidung verschiedener Gesteine nach ihrer Dichte möglich. Bei bekannter Lithologie können im Festgestein Kluffzonen erkannt werden.

## Neutron-Log

Messverfahren:

Schnelle Neutronen werden von einer Neutronenquelle (meist Americium-Beryllium oder Plutonium-Beryllium) im Bohrloch kontinuierlich ausgesandt. Durch die Kollision mit Atomen gleicher Masse, wie z. B. dem Wasserstoffatom, werden die Neutronen abgebremst. Manche Neutronen werden so stark abgebremst, dass sie von anderen Atomkernen eingefangen werden können ( hauptsächlich vom Chlor). Die abgebremsten Neutronen werden von zwei weiter oben liegenden  $^3\text{He}$ -Detektoren gezählt. Aus den Zählraten der beiden mit längerem und kürzerem Abstand zum Strahler angeordneten Detektoren wird das Verhältnis berechnet. Die Verwendung von zwei Detektoren ermöglicht eine bessere Linearität und Kaliberunabhängigkeit der Messdaten (kompensierte Neutronensonde). Bei der Pulsed-Neutron-Sonde wird anstelle einer chemischen Neutronen-Quelle ein elektrisch betriebener (an- und abschaltbarer) Neutronengenerator eingesetzt. Dieses Verfahren reduziert die Sicherheitsmassnahmen ist aber sehr teuer.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Die Neutronenmessung hängt hauptsächlich vom Wasserstoffgehalt in der Nähe der Sonde ab. Da der meiste Wasserstoff im Untergrund in Form von Wasser und Kohlenwasserstoffen als porenfüllendes Medium angetroffen wird, ist die Neutronenmessung ein gutes Messverfahren zur Bestimmung der Gesteinsporosität (Gesamtporosität).

### 3.5.3.4 Elektrische Verfahren

Mit elektrischen Widerstandsverfahren und Leitfähigkeitsverfahren können Erkenntnisse über Gesteinsaufbau, Porenflüssigkeit und Bohrlochflüssigkeit gewonnen werden. Welches Verfahren angewandt wird hängt von den konkreten Gegebenheiten wie Gesteinsaufbau, Salzgehalt des Grundwassers usw. ab. Bei den Widerstandsverfahren ist die Kenntnis über das Verhältnis wahrer Gebirgs- / Spülungswiderstand bzw. Bohrlochflüssigkeitswiderstand für die Auswahl der geeigneten Widerstandsmethode wichtig. Besonders mit dem Mikrolaterolog (MLL) und dem fokussierten Induktionsverfahren können Klüfte, Klufzonen oder Verkarstungen erkannt werden.

#### **Laterologsonde**

Messverfahren:

Bei diesem Verfahren wird der Stromfluss einer einzelnen Bohrlochelektrode durch Zusatzelektroden fokussiert. Damit kann die vertikale Auflösung und die seitliche Aufschlusstiefe erhöht werden.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Die aufgezeichneten Widerstandskontraste lassen Rückschlüsse auf die Lithologie zu, besonders können Wechsellagerungen erkannt werden. Tonige Bereiche zeigen geringere Widerstände als sandige Partien. Bei versalzten Grundwässern zeigen aber auch Sandlagen geringe Widerstände.

Bei starken Widerstandskontrasten können noch Bereiche von wenigen Zentimetern unterschieden werden, was die Methode auch zur Kluftdetektion im Festgestein geeignet macht. Die seitliche Auflösung entspricht einer 160 cm Normalen.

Größere Bohrl Lochdurchmesser und Spülungsinfiltrationen verschlechtern die Messergebnisse. Bei ausgebauten Bohrungen mit PVC-Rohren sind nur qualitative Interpretationen möglich, bei stahlverrohrten Bohrungen sind keine brauchbaren Ergebnisse zu erwarten.

Die Methode ist gut geeignet für Bereiche, wo der Gesteinswiderstand größer als der Widerstand der Bohrlochflüssigkeit ist.

#### **Microlog**

Messverfahren:

Die Sonde zeichnet den elektrischen Widerstand in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs auf. Die Elektrodenanordnung in der Sonde mit sehr kleinen Elektrodenabständen von 1 bis 2 Zoll wird bei der Messung an die Bohrlochwand gepresst. Damit kann die Spülung bzw. die Bohrlochflüssigkeit verdrängt werden. Eine Bohrlochkorrektur ist deshalb nicht notwendig.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Beim Einsatz im Festgestein können neben der Erkennung von Kleinschichtung auch Klüfte erkannt werden. Für den Einsatz anderer Widerstandsverfahren kann aus dem ML der spezifische Widerstand der Bohrlochringzone als Korrekturgröße ermittelt werden. In ausgebauten Bohrlöchern ist die Sonde nicht verwendbar.

### **Salinometersonde**

Messverfahren:

Durch eine besondere Elektrodenanordnung wird erreicht, dass nur der spezifische Widerstand der Bohrlochflüssigkeit gemessen wird. Die Elektrodenabstände betragen nur wenige cm. Sie sind in einem isolierten metallischen Rohr angebracht, durch das die Bohrlochflüssigkeit strömen kann. Die Messung erfolgt während des Einfahrens der Sonde in das Bohrloch.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Bei einer Kalibrierung im Labor mit einer Standardsalzlösung und zusätzlichen Angaben zur Temperatur kann der Gesamtsalzgehalt errechnet werden. Bei einer künstlichen Versalzung der Bohrlochflüssigkeit können süße Grundwasserzuflüsse erkannt werden. Bei stahlverrohrten und geschlitzten Rohren kann es zu starken Tiefen- und Mengenverschiebungen kommen.

### **Induction-Log**

Messverfahren:

Ein reziprokes Verfahren zu den Widerstandsverfahren. Durch eine Sendespule werden elektromagnetische Wellen in das umgebende Gebirge abgestrahlt. Dadurch bilden sich je nach Leitfähigkeit des Gebirges, mehr oder weniger starke Wirbelströme um das Bohrloch aus, deren magnetische Felder in einer Empfangsspule Spannungen induzieren. Die fokussierte Induktionssonde des NlfB (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung) hat bei mäßigem Leitfähigkeitskontrast der Schichtenfolge eine Vertikalauflösung von etwa 0,6 m und eine horizontale Reichweite von ca. 1 m.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Aus Amplitude und Phasenlage der induzierten Spannungen ergibt sich die spez. Leitfähigkeit des Gebirges. Auf dem Messdiagramm können Vererzungen, Graphitlager, Kohleflöze, mylonitisierte Zonen, örtliche Verkarstungen und solehaltige Aquifere erkannt werden. Die Messungen eignen sich speziell für den Fall, dass der Gebirgs-widerstand kleiner als der Flüssigkeitswiderstand in der Bohrung ist. Die Messung kann auch im luffertüllten oder in einem mit Kunststoff verrohrtem Bohrloch erfolgen. Hohe Gebirgs-widerstände liefern nur kleine Messsignale. Widerstände über 100 Ohm m können nicht mehr genau abgelesen werden.

### **Fluid-Logging**

Messverfahren:

In einem Bohrloch wird die Bohrlochflüssigkeit gegen ein Fluid mit deutlich niedrigerer oder höherer elektrischer Leitfähigkeit gegenüber der Leitfähigkeit des Formationsfluides ausgetauscht. Mit einer konstanten Pumprate wird ein hydraulisches Gefälle zum Bohrloch hin erzeugt. Mit mehreren Messfahrten kann dann die zeitliche Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit durch eindringende Formationsfluide in Abhängigkeit von der Tiefe registriert werden. Die einzelnen Zustrombereiche werden als Peaks im Leitfähigkeitslog sichtbar. Die Absenkung und der Wiederanstieg des Bohrlochwasserspiegels beim Pumpen wird als Pumpversuch ausgewertet.

Auswertung und Untersuchungsziel:

Aus den Leitfähigkeitslogs ((Mikrosiemens/cm)/m Tiefe) können mit verschiedenen analytischen und numerischen Verfahren die Zuflussraten ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) und Teiltransmissivitäten einzelner Zuflusszonen berechnet werden. Die Gesamttransmissivität kann aus dem Pumpversuch ermittelt werden.

Das Verfahren ist besonders geeignet, um wasserführende Klüfte auch bei sehr kleinen Zuflüssen zu identifizieren und die Zuflussmengen zu quantifizieren. In einer Tiefbohrung bei Leuggern (Schweiz) konnten Zuflussraten bis hinab zu 5 – 10 ml/min gemessen werden (NAGRA, 1988). Bei zu hohen Zuflussraten kann es bereits zu einer Ausgleichung der Leitfähigkeit in der Bohrlochflüssigkeit kommen, bevor der erste Log gemessen wird. Teilweise kann aber durch veränderte Pump-raten der Wasseraustausch verzögert werden (TSANG & HUFSCHMIED, 1988). Das Fluid-Logging ist geeignet für Durchlässigkeitsbereiche zwischen  $k_f$   $5 \cdot 10^{-4}$  und  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s (ROSENFELD, 1998).

### **3.5.3.5 Akustische Verfahren**

#### **Sonicsonde, BHC-Sonicsonde: Akustiklog, Sonic-Velocity-Log**

Messverfahren:

Bei diesem Verfahren wird die Laufzeit des Schalls kontinuierlich aufgezeichnet. Die Laufzeit ist die Zeit, die der Schall vom Schallgenerator auf der Sonde durch die Gesteinsschichten der unmittelbaren Bohrlochumgebung zum Detektor auf der Sonde benötigt. Die Sonicsonde sendet kleine Schallexplosionen mit einer Frequenz von 20 kHz (etwa 10 bis 20 pro Sekunde) aus.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls in Sedimentgesteinen hängt von der Lithologie und von der Porosität ab. Bei bekannter Matrix-Laufzeit und der Porenflüssigkeitslaufzeit (Wasser 1700 m/s) kann die Gesteinsporosität ermittelt werden. Für Lockergesteine muss ein empirischer Korrekturfaktor eingeführt werden.

Eine direkte Beziehung zwischen den Schallgeschwindigkeitsvariationen und der Klüftpermeabilität ist nicht gegeben (PAILLET & KEYS 1984), Klüftigkeit kann aber erkannt werden. Heute werden ausschließlich BHC-Sonicsonden verwendet (BHC: Bore Hole Compensated). In ausgebauten Bohrungen ist die Sonde nicht einsetzbar.

### **Bohrlochteleviewer**

Messverfahren:

Ein Ultraschallsender, der an einer rotierenden Achse montiert ist, misst, die an der Bohrlochwand reflektierten Schallwellen. Dabei entsteht ein Ultraschallbild der gesamten Bohrlochwand.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Das Verfahren eignet sich zur Erkundung von Trennfugen und deren räumlicher Orientierung. Schräg einfallende Trennflächen werden als sinusförmige Kurven sichtbar. Aus diesen Kurven können in Kombination mit einem Magnetometer Streichen und Fallen ermittelt werden.

### **3.5.3.6 Optische Verfahren**

#### **Fernsehkamera, Photokamera**

Messverfahren:

Bei den optischen Methoden wird zwischen axialen (senkrecht nach unten gerichteten) und radialen (auf die Bohrlochwand gerichteten) Aufnahmen unterschieden. Mit fotografischen Kameras sind meist nur Axialsichten möglich. Ausrüstungen für Weitwinkel- und Videoverfahren werden sowohl mit radialer als auch mit axialer Aufnahmerichtung angeboten. Für spezielle Aufgaben können den Kameras Geräte vorgeschaltet werden (z.B. Klinometer, Kompass). Fotografische Aufnahmen verwenden Negative oder Diapositive. Bei Videoeinrichtungen kann das Fernsehbild direkt am Monitor verfolgt und eine Videoaufzeichnung mitgeschnitten werden.

Versuchsauswertung und Untersuchungsziel:

Video-Befahrungen in Farbe in Kombination mit Kompass und evtl. Dipmeter können zur Ortung von Klüftzonen eingesetzt werden. Befahrungen sind in Wasser oder Luft möglich. In wenig durchlässigen Gesteinen kann eine direkte Ortung von Wasserzuflüssen bei leergepumpten Bohrloch erfolgen und die Zuflussmengen abgeschätzt werden. Bei Befahrungen unter dem Wasserspiegel muss die Bohrlochflüssigkeit klar sein.

### 3.6 Zusammenfassende Verfahrensbeurteilung

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten der in Kap. 3.5 beschriebenen Verfahren zur In-situ-Erhebung hydraulischer Daten dargestellt. Die Betrachtung konzentriert sich auf diejenigen Verfahren, die für die Datenerhebung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen besonders geeignet erscheinen. Da die Untersuchungen auf potentiell gering durchlässige Gebirgsbereiche in größeren Tiefenlagen (um ca. 500 m unter Geländeoberfläche) ausgerichtet sind, handelt es sich bei den Hauptuntersuchungsorten um Tiefbohrungen und Stollen (Tunnel) von Felslabors.

Bei den Tiefbohrungen nehmen **Packerversuche** eine herausragende Stellung ein. Sie wurden deshalb bei der Beschreibung der Einzelverfahren besonders ausführlich dargestellt. Die größte Anzahl der hier zusammengetragenen Einzeldaten stammt aus solchen Versuchen.

Die Vorteile von Packerversuchen sind:

- Damit können tiefengenau ( $\pm 1$  m) auch sehr gering durchlässige Gebirgsbereiche (Pulse-Test bis ca.  $k_f 10^{-14}$  m/s) getestet werden.
- Ihr Einsatz kann auch in großen Tiefen erfolgen.
- Sie liefern recht gut abgesicherte Werte, da meist mehrere Packertests nacheinander durchgeführt werden.
- Der Erfahrungsstand bei diesen Verfahren ist hoch, sie sind relativ Kostengünstig, da die Versuchsdauer in der Regel im Stundenbereich liegt.

Nachteile sind:

- Geringe horizontale Eindringtiefe (Reichweite) in die Gebirgsformation.
- Der Speicherkoeffizient kann nur abgeschätzt werden.
- Aussagen über Aquifermodell, Aquiferränder und Anisotropie sind nur begrenzt mit speziellen Auswerteverfahren möglich.

Bei den **Bohrloch-Logging-Verfahren** werden die geophysikalischen Bohrlochsonden, wie sie seit langem in der Erdölindustrie verwendet werden, meist in der Vorerkundungsphase eingesetzt. Sie zeigen tiefenbezogene lithologische Wechsel oder Gefügeunterschiede in der Gesteinsabfolge (z. B. Kaliberlog, Density-Log, Gamma Ray, Microlog). Mit Flowmeter-Messungen lassen sich Zu- und Abflüsse in ihrer Stärke quantifizieren. Zunehmend an Bedeutung gewinnt das noch recht junge Leitfähigkeits-Fluid-Logging. Dieses Verfahren wurde von der schweizerischen Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) für Standortuntersuchungen entwickelt (TSANG & HUFSCHMIED, 1988). Gekoppelt mit einem Pumpversuch können Transmissivitäten von Zuflusszonen im Bohrloch bis  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s quantitativ bestimmt und gleichzeitig ihre Tiefenlage

gemessen werden. Das Verfahren ist kostengünstiger als Packertests. Nachteilig ist, dass nur die Transmissivität von Zuflussbereichen gemessen werden kann. Dazwischen liegende geringer durchlässige Gebirgsbereiche bleiben unberücksichtigt.

**Tracerversuche** liefern Daten über Abstandsgeschwindigkeiten und Fließwege, die mit anderen Versuchen nicht erhalten werden können. Mit speziellen Packer-Mehrbohrloch-Tracerversuchen können einzelner Kluffzonen über größere Entfernungen verfolgt werden. Da bei Packerversuchen meist mit Porositätsmodellen gearbeitet wird, sind Aussagen nur über Filtergeschwindigkeiten möglich. In klüftigem Gestein, besonders im Kristallin, werden in Kluffzonen oft höhere „wirkliche“ Geschwindigkeiten erreicht, die aber auf relativ eng begrenzte Volumenbereiche beschränkt sind. Die Messung von Abstandsgeschwindigkeiten mit Tracerversuchen kann dabei zu realistischeren Ergebnissen als andere Untersuchungen führen. Der Nachteil von Tracerversuchen ist ihr hoher Aufwand (Eingabestelle, Messstellensystem), lange Versuchszeiten (Tage bis Monate) und den damit verbundenen hohen Kosten.

Um großräumige Aussagen über hydraulische Parameter machen zu können eignen sich bei den Bohrlochversuchen **Langzeitpumpversuche** mit Piezometermessungen oder in Stollen **Ventilationsversuche**. Wie Tracerversuche sind sie aber auch sehr zeit- und kostenintensiv.

Im Hinblick auf die räumliche Aussagekraft der Daten und die - wegen des Aufwands - üblicherweise durchgeführte Anzahl von Tests lassen sich die verschiedenen Verfahren folgenden Untersuchungsstufen zuordnen:

- Kleinskaliger Bereich: Packerversuche an Kluffzonen und im intakten Gebirgsbereich (inkl. Bohrloch-Logging) mit einer großen Anzahl von Einzeltests.
- Mittelskaliger Bereich: Interferenzversuche (hydraulische Mehrbohrlochversuche und Tracerversuche) mit einer mittleren bis geringen Anzahl von Versuchen.
- Großskaliger Bereich: Langzeitpumpversuche und Ventilationsversuche mit einer geringen bis sehr geringen Versuchsanzahl.

Die Anzahl der Daten wird dann in der Reihenfolge kleinskalig > mittelskalig > grossskalig zunehmen.

Es ist davon auszugehen, dass im klein- bis mittelskaligen Bereich die eher stärker durchlässigen Bereiche dominieren, weil Kluffzonen stärker untersucht werden und sehr gering durchlässige Gebirgsbereiche wegen unterschreiten der Messbereiche herausfallen. Danach ist zu erwarten, dass die Mittelwerte dieser Datensätze höhere Durchlässigkeiten zeigen als die Werte der großskaligen Versuche. Tritt der umgekehrte Fall ein, sind vermutlich stärker durchlässige Zonen im großskaligen Einflussvolumen nicht erkannt worden (ungeachtet technischer Gründe).

Bei den im Anhang dargestellten Daten handelt es sich überwiegend um hydraulische Packerversuche. Die Genauigkeit der Messergebnisse hängt dabei in erster Linie von der Qualität der Datenerhebung ab. Besonders bei geringen Durchlässigkeiten sind genaue Druck- und Mengenmessungen entscheidend. Nach dem heutigen Stand der Technik kann aber der dadurch verursachte Fehler als gering angesehen werden.

Da die größte Anzahl von Werten aus Einbohrloch-Packerversuchen stammen, ist der überwiegende Teil der Daten als kleinskalig anzusehen und aus methodischer Sicht gut miteinander vergleichbar. Auch Fluid-Logging-Daten sind als kleinskalig einzuordnen und zusammen mit Packerversuchsdaten auswertbar. Wegen der geringen räumlichen Repräsentativität ist räumliche Aussagekraft von Einzelwerten beschränkt.

Im Gegensatz zur Durchlässigkeit sind die durch Packerversuche ermittelten Speicherkoeffizienten wesentlich unsicherer. Aus diesem Grund sind in den Quellen auch nur wenige Werte angegeben. Ihre Bedeutung für die Kriterienentwicklung wird in Kapitel 5.4 diskutiert.

Methoden	Versuchsdauer (h)	R (m) / EV (m <sup>3</sup> )	Messbereiche	Tiefengenaugigkeit	Kostenaufwand	Erfahrung	Aussagen, Parameter
Langzeitpumpversuch (Aquifertest)	10 - >100 [1]	R: 10 - >300 [1]	$k_f: 10^{-2} - 10^{-7}$ [1]	nicht relevant	hoch	hoch	Aquifermodell, Aquiferränder, Anisotropie, D, S
Auffüllversuch	h-Bereich	R: 1 - 10	$k_f: 10^{-5} - 10^{-7}$	nicht relevant	gering	hoch	D, S
Einschwingversuch (Impedanztest)	h-Bereich	R: 1 - 10	$k_f: 10^{-2} - 10^{-6}$ [3]	nicht relevant	gering	mittel	D
Gezeitenverfahren		EV: >100 000, oft unbekannt		nicht relevant	gering	gering	D (grobe Mittelwerte)
Abpressversuch (WD-Test)	0,2 - 0,25 pro Druckstufe [3]	R: 10 [1]	$k_f: 10^{-4} - 10^{-8}$ [3]	+ /- 1m [1]	gering	hoch	D
Injektionstest	10 - >100 [1]	R: 10 - >100 [1]	$k_f: >10^{-10}$ [4]	+ /- 1m [1]	mittel	hoch	D (S abschätzbar)
Pumptest	10 - >100 [1]	R: 10 - >100 [1]	$k_f: 10^{-6} - 10^{-8}$ , $>10^{-9}$ [4]	+ /- 1m [1]	mittel	hoch	D (S abschätzbar)
Slug- und Bail-Test	0,1 - 10 [1]	R: 1 - 10 [1]	$k_f: 10^{-2} - 10^{-9}$ [3], $>10^{-10}$ [4]	+ /- 1m [1]	gering	hoch	D (S unsicher)
Drill-Stem-Test	1 - 10 [1]	R: 1 - 10 [1]	$k_f: 10^{-5} - 10^{-8}$ [3], $>10^{-10}$ [4]	+ /- 1m [1]	gering	hoch	D
Pulse-Test	0,1 - 10 [1]	R: 1 [1]	$k_f < 10^{-7}$ [3], $10^{-8} - 10^{-14}$ [4]	+ /- 1m [1]	gering	hoch	D (für sehr geringe D geeignet, S unsicher)
Squeeze-Test	0,1 - 10 [1]	R: 1 [1]	$k_f < 10^{-7}$ [1]	+ /- 1m [1]	gering	mittel	D (S unsicher)
Packer-Flowmeter-Logging			T: $5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-7}$ [5]				D, tiefengenaue Zufluss-, Abflussmessung

Tabelle 3-1a Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen

(Fortsetzung s. Tab. 3-1b, Erläuterungen s. Tab. 3-1c)

Methode	Versuchsdauer (h)	R (m) / EV (m <sup>3</sup> )	Messbereiche	Tiefengenauigkeit	Kostenaufwand	Erfahrung	Aussagen, Parameter
Kaliberlog	h-Bereich			mm-Bereich	gering	hoch	Härteunterschiede, Auflockerungszonen
Propellerflowmeter	h-Bereich		ab 10 mm/s vertikale Strömungsgeschwindigkeit		gering	hoch	Grundwasserzuflüsse, Tiefenlage und Stärke
Heat-Pulse Flowmeter	h-Bereich		1-100 mm/s vertikale Strömungsgeschwindigkeit			gering	Grundwasserzuflüsse, Tiefenlage und Stärke, auch für geringe Zuflüsse
Temperatur-Log	h-Bereich		ab 0,01 °C Temperaturschwankung		gering	hoch	Grundwasserzuflüsse Tiefenlage und rel. Stärke
Gamma Ray	h-Bereich		bis 0,3 m Schichtauflösung	0,3 m	gering	hoch	Lithologie (Tongehalt)
Density-Sonde	h-Bereich	R: 0,15 - 0,2			mittel	hoch	Lithologie, (Dichteunterschiede), Porosität, Trennflächen
Neutron Log	h-Bereich				mittel	hoch	Gesteinporosität
Laterologsonde	h-Bereich	R: 1 - 2			gering	hoch	Trennflächen, Schichtgrenzen, Lithologie (Ton/Sand)
Microlog	h-Bereich					hoch	Trennflächen, Schichtenfeinauflösung

Tabelle 3-1b Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen

(Fortsetzung von Tab. 3-1a, Fortsetzung u. Erläuterungen s. Tab. 3-1c)

Methode	Versuchsdauer (h)	R (m) / EV (m <sup>3</sup> )	Messbereiche	Tiefengenauigkeit	Kostenaufwand	Erfahrung	Aussagen, Parameter
Salinometersonde	h-Bereich				gering	hoch	Zufluss-, Abflusszonen, Tiefenlage
Induction-Log	h-Bereich	R: 1		+ /- 0,6 m	mittel	hoch	Lithologie (spez. Gebirgsleitfähigkeit)
Fluid-Logging (quantitativ)	0,5 - 100 [1]	R: 10- >100 [1]	T: 10 <sup>-10</sup> [6]	+ /- 1m [1]	mittel	mittel	Lokalisierung von Zufluss-, Abflusszonen, D (Kluftdurchlässigkeit)
Elektrolytischer Tracer	Tage-Monate	R: bis Einzugsgebiet		nicht relevant	hoch	hoch	Abstandsgeschwindigkeit, Fließwege, Anisotropie
Sporendrift, Mikro-partikel	Tage-Monate	R: bis Einzugsgebiet		nicht relevant	hoch	mittel	Abstandsgeschwindigkeit, Fließwege, Anisotropie, Kluftöffnungsweiten
Ventilationsversuch	Wochen-Monate	EV: >100 000 [2]	k <sub>f</sub> : bis >10 <sup>-10</sup>	nicht relevant	hoch	gering	D (Makropermeabilität)
R - Reichweite      EV - Einflussvolumen      kf - Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)      T - Transmissivität (m <sup>2</sup> /s)      D - Durchlässigkeit (kf, T) S - Speicherverhalten (Speicherkoefizient)							
Angaben aus: [1] HEKEL (1994)      [2] LONG et al. (1981)      [3] SCHREINER & KREYSING (1997) [4] OSTROWSKI & KLOSKA (1989)      [5] AMMANN et al. (1993)      [6] GUYONNET et al. (1993)							

Tabelle 3-1c      Merkmale verschiedener Methoden zur Erhebung hydraulischer Informationen

(Fortsetzung von Tabelle 3-1b)

## **4. Zusammenstellung der Datensätze**

### **4.1 Datenherkunft**

Die in den folgenden Abschnitten kurz und zusammenfassend beschriebenen und im Anhang dokumentierten Daten sind im Zuge einer umfassenden Literaturrecherche zusammen getragen worden. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Daten zur Wasserdurchlässigkeit. Soweit Daten zum Speichervermögen (Speicherkoeffizient und spezifischer Speicherkoeffizient) ermittelt wurden, sind sie in den Tabellen mit angegeben. Messtechnisch bestimmte Daten zum durchflusswirksamen Hohlraumvolumen liegen dagegen nicht vor.

Die Daten stammen überwiegend aus publizierten Einzelberichten und untergeordnet aus unveröffentlichten Gutachten. In den Tabellen sind diese Quellen als Originalberichte gekennzeichnet. Daten aus der Sekundärliteratur mit zusammenfassenden Darstellungen werden als "zitierte Daten" bezeichnet. Sämtliche Quellen sind im Quellenverzeichnis in Kapitel 7 aufgeführt.

In den Anhang aufgenommen wurden nur solche Daten, die gemäß der Verfahrensbeurteilung in 3.6 die für die spätere Kriterienentwicklung erforderliche Zuverlässigkeit und räumliche Repräsentativität aufweisen.

Bei der Recherche wurde angestrebt, eine hinsichtlich der Zielsetzung und der angewendeten Erhebungsmethoden möglichst große Bandbreite der Daten zu erreichen. Dazu wurde gezielt nach Daten aus folgenden Erhebungszusammenhängen gesucht:

- Endlagerung radioaktiver und "herkömmlicher" Abfälle bzw. vergleichbare Anwendungsgebiete (z.B. Untersuchungen zum Einbringen von Abfällen zur Verwertung als Bergversatz,
- Wasserwirtschaft (Grundwassererschließung) zur Trink- oder Brauchwassergewinnung,
- Wasserwirtschaft im Bergbau,
- Erdöl/Erdgas-Erschließung.

Bisher konnten noch nicht alle Datensätze, deren Existenz im Zuge der Recherche bekannt geworden ist, erfasst und ausgewertet werden, da sie nicht rechtzeitig für diesen Zwischenbericht vorlagen. Der Katalog der Datensätze in Anhang muss daher bei Fortsetzung des Projektes fortgeschrieben werden.

Die bislang vorliegenden Daten sind überwiegend im Zuge von Untersuchungen zur Erkundung von Standorten für die Endlagerung "konventioneller" und radioaktiver Abfälle erhoben worden. Daten aus anderen Erhebungszusammenhängen, etwa der Wasserwirtschaft, haben gegenüber denen aus der Endlagerung mengenmäßig nur nachgeordnete Bedeutung (s. Tab. 4-1). Daten aus der Kohlenwasserstoff-Exploration und -Erschließung konnten bisher überhaupt noch nicht in nen-

nenswertem Umfang erhoben werden und sind im Anhang noch nicht enthalten. Dafür sind folgende Gründe ausschlaggebend:

- Die vorliegenden Daten aus der **Wasserwirtschaft** beziehen sich überwiegend auf Gesteinstypen mit relativ hoher Gebirgsdurchlässigkeit und stammen zudem überwiegend aus geringer Tiefe unter Geländeoberfläche. Auf Grund der spezifischen Zielsetzung sind die für die Endlagerung gesuchten Gesteinstypen mit geringer Wasserdurchlässigkeit in wasserwirtschaftlichen Datensätzen deutlich unterrepräsentiert und wegen ihrer "Verdünnung" in den Daten zu anderen Gesteinstypen im Zuge der systematischen Datenrecherche nur schwierig vollständig zu identifizieren.
- Ähnliches gilt auch für Durchlässigkeitsangaben aus der Erdöl- und Erdgas-Exploration. Hier kommt erschwerend hinzu, dass es sich bei den weitaus meisten veröffentlichten Daten nicht um Ergebnisse von In-situ-Messungen handelt, sondern um aus Bohrlochuntersuchungen abgeleitete bzw. im Labor bestimmte Werte. Die Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen sind nur ausnahmsweise veröffentlicht bzw. für Außenstehende zugänglich.

Insgesamt liegen bislang ca. 50 Datensätze mit knapp 2200 Einzelwerten von mehr als 20 Lokationen vor. Einen ersten Überblick über die geographische Herkunft und die petrographische Zuordnung der bislang erfassten Daten liefert Tab. 4-1.

Gut 1200 Daten entfallen bisher auf kristalline Gesteine und knapp 1000 Daten auf Sedimentgesteine. Die Datendichte ist bei den einzelnen Gesteinstypen dieser genetischen Gesteinsgruppen sehr unterschiedlich. Besonders gut belegt sind beim gegenwärtigen Bearbeitungsstand die kristallinen Gesteine Granit und Gneis mit rund 600 bzw. gut 300 Daten sowie die Sedimentgesteine Ton bzw. Tonstein mit zusammen rund 590 und Mergelstein mit über 100 Daten. Der Rest entfällt auf in den ausgewerteten Quellen teilweise sehr speziell benannte Gesteinstypen (Beispiel: Brekzie, Lamprophyr, Aplit), die jeweils nur durch einzelne bzw. einige wenige Daten repräsentiert werden. In den nächsten Arbeitsschritten sind diese speziellen Gesteinstypen den übergeordneten Typen, wie Gneis oder Granit, zuzuordnen. In mehreren Testabschnitten treten lithologisch sehr inhomogene Gesteine auf. Besonders in längeren Testintervallen sind häufig mehrere Gesteinstypen erfasst worden. Dabei handelt es sich teilweise um Wechsellagerung von z.B. Ton- und Mergelstein oder Ton- und Sandstein innerhalb einer stratigraphischen Abfolge oder - seltener - um tektonisch und/oder stratigraphisch unterschiedliche Einheiten, wie z.B. die verzahnten helvetischen Deckenstapel im Bereich Wellenberg (Schweiz). Für diese Testbereiche muss in der nächsten Arbeitsphase im Einzelfall entschieden werden, ob sie einer übergeordneten Gesteinsgruppe zugeordnet werden können oder ob dafür gesonderte Lithotypen zu etablieren sind.

Die weitaus überwiegende Anzahl der Werte im Anhang sind mit Packertests erhoben worden. Auf Packertests beruhende Verfahren zur Erhebung der Wasserdurchlässigkeit sind ausgereift (s. Kap.

3.6). Bei sorgfältiger Ausführung sind die erzielten Ergebnisse daher miteinander vergleichbar. Aus rein methodischer Sicht stellen die Daten daher eine solide Grundlage für die Ableitung von Kriterien dar.

Lokation	Zielsetzung der Untersuchungen	Hauptgesteinstyp
Belgien, Mol, Untergrundlabor Hades	Endlager	Ton (Boom-Formation, Tertiär)
Deutschland, Gorleben	Endlager	Steinsalz
Deutschland, Asse	Endlager	Ton-Mergelstein
Deutschland, Hoheneggelsen	Sonderabfall-Deponie	Tonstein (Unterkreide)
Deutschland, Münchehagen	Sonderabfall-Deponie	Tonstein (Unterkreide)
Deutschland, Schwarzwald	Mineralwasser, Thermalwasser	Granit, Gneis
Deutschland, Schwäbische Alb	Sonderabfall-Deponie	Tonstein (Opalinuston, Dogger)
Deutschland, Urach	Forschungsbohrung, thermische Energie	Gneis
Deutschland, KTB-VB	Forschungsbohrung	Gneis, Amphibolit
Finnland, Loviisa, Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto, Romuvaara	Endlager	Granit, Gneis
Frankreich, Tournemire	Endlager	Tonstein, Mergelstein (Lias, Dogger)
Großbritannien, Sellafield	Endlager	Tuffit (Borrowdale Volcanic Group)
Japan, Tono, Kamaishi	Endlager	Granit
Kanada, Lac di Bonnet	Endlager	Granit
Spanien, Duero	Nicht bekannt	Tonstein (San Pedro Ton-Formation, Tertiär)
Schweden, Felslabor Stripa	Endlager	Granit
Schweden, Finnsjö, Sternö	Endlager	Granodiorit, Gneis
Schweiz, Felslabor Grimsel	Endlager	Granit Granodiorit
Schweiz, Nordschweiz	Endlager	Granit, Gneis, Sedimentgesteine
Schweiz, Wellenberg	Endlager	Tonmergelstein (Palfris-Formation)
Schweiz, Erdsondenfeld Burgdorf	Nicht bekannt	Sedimentgesteine (Untere Süßwassermolasse)
USA, Maryland	Luftdruckspeicher	Gneis
USA, Yucca Mountain	Endlager	Tuff (Tertiär)
USA, Zentral-USA	Nicht bekannt	Tonstein (Kreide, Pierre Shale)

Tab. 4-1 Kurzcharakterisierung der erfassten Datensätze

## 4.2. Systematik der Datenzusammenstellung

Die Daten sind unter dem Gesichtspunkt, dass die Basis- oder Ausgangsdaten möglichst viele Informationen in knapper Form enthalten sollen, zu Datensätzen zusammengefasst. Auch bei einer späteren Zusammenführung der Daten zu größeren Einheiten mittels bestimmter Kriterien oder mit Blick auf bestimmte Auswertungsziele lassen sich die Einzelwerte auf die Grunddatensätze zurückführen. Die Grunddatensätze enthalten folgende Angaben:

**Lokation** (Land, Region, Standort) mit Zielsetzung der Untersuchungen.

**Untersuchungsreihe:** Zu jeder Lokation gehört mindestens eine Untersuchungsreihe. Zu jeder Reihe sind eine Tabelle und ein Textblatt vorhanden. Die **Tabelle** enthält in Zeilen die einzelnen Versuche. In den **Textblättern** werden zusammenfassende Angaben über die Untersuchungsreihe gemacht (Lage, Datenquelle, Lithologie, Gefüge, Testbereich, Testart, Testauswertung, Skalenbereich, erfasster Bereich).

**Versuch:** Einzelversuche können auch aus einer Testserie bestehen (z. B. bei Packerversuchen), die mehrere Werte liefern. Sie sind dann als Minimal-, Maximal- und Mittelwerte oder als beste Schätzwerte (aus der Datenquelle) aufgelistet. Jede Zeile enthält Angaben in Kürzelform nach Spalten unterteilt:

- Lok: Lokation (Standort, Bohrung)
- T1: Test-Nr. (wenn möglich, aus den Quelldaten übernommen)
- T2: Testtyp 1 ( Ein- oder Mehrbohrlochversuch)
- T3: Testtyp 2 (z. B. Pulse-Test, Slug-Test)  
Tiefenbereich (z. B. Testintervall mit Ober-, Untergrenze oder Intervallmitte)  
Werte (z. B. Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwert, Speicherkoeffizient)
- G1 Gesteinsgruppe: Sedimentgestein oder kristallines Gestein
- G2 Gesteinstyp (z. B. Sandstein, Granit, Kalkstein)
- G3 Gestein (näher beschreibende Bezeichnung, z. B. Globigerinenmergel, Opalinuston, Malm-Kalkstein)
- D1 Datengruppe: Die einzelnen Werte repräsentieren entweder einen Versuch oder wurden aus der Datenquelle als Mittelwerte übernommen.
- D2 Datenherkunft: Aus Originalbericht oder als zitierte Daten aus der Sekundärliteratur.
- D3 Aussagebereich der Werte: Kleinskalig, mittelskalig, grossskalig. Diese Angaben beziehen sich auf das Einflussvolumen (Reichweite) der Versuche. Sie sind hauptsächlich aus dem Testverfahren und der Testdauer abgeschätzt:
  - Kleinskalig: bis ca. 10 m Reichweite, Packerversuche,
  - mittelskalig: bis ca. 100 m Reichweite, spezielle Packerversuche, Mehrbohrlochversuche und Tracerversuche,

grossskalig: über 100 m Reichweite, Langzeitversuche, bestimmte Tracerversuche, Ventilationsversuche.

Soweit verfügbar, sind auch noch Angaben zum Gefüge des Testintervalls bzw. (in der Spalte Bemerkungen) zusätzliche Informationen aufgeführt.

Lokation und Test-Nr. (Lok und T1) bilden den Identifikationsschlüssel der Versuche. Jede Tabelle ist mit einem Tabellenkürzel eindeutig gekennzeichnet und darüber mit dem entsprechenden Textblatt verknüpft.

Textblätter und Daten-Tabellen sind im Anhang dargestellt.

## **5. Beurteilung der Datensätze für die Kriterienentwicklung**

### **5.1 Faktoren mit Bedeutung für die Datenqualität**

Gebirgsdurchlässigkeit und durchflusswirksames Hohlraumvolumen werden von einer Reihe naturgesetzlicher und technischer Faktoren beeinflusst, die der einfachen und eindeutigen Festlegung von Wertebandbreiten für bestimmte Gesteinstypen möglicherweise entgegen stehen. Diese Unsicherheiten sind vor der Verwendung des Gesteinstyps als Indikator für bestimmte Bandbreiten der Gebirgsdurchlässigkeit bzw. des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens bzw. der Ableitung entsprechender Kriterien zu überprüfen. Sie liegen vor allem in folgenden Bereichen:

- a) Der quantitative Zusammenhang zwischen Wasserdurchlässigkeit und Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit von der Art der Strömung im Gesteinskörper (+/- laminar oder turbulent) durch verschiedene Gesetze beschrieben. Welches Gesetz zutrifft, hängt im wesentlichen von Art und Öffnungsweite der Trennfugen im Gestein ab und ist nicht immer von vornherein zuverlässig bekannt. Die Gültigkeit der Gesetze hängt von der Einhaltung bestimmter Randbedingungen ab (z.B. Wassersättigung), deren Einhaltung nicht immer belegt ist.
- b) Die vorliegenden Daten, insbesondere zur Wasserdurchlässigkeit, sind mit unterschiedlicher Zielsetzung, mit unterschiedlichen Verfahren und unterschiedlichem technisch-wissenschaftlichen Standard erhoben worden. Messtechnische Qualität und Aussagekraft der zu einem Gesteinstyp vorliegenden Daten sind uneinheitlich.
- c) Die Bestimmung der Durchlässigkeit und des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens von Gesteinen mit geringer oder sehr geringer Wasserdurchlässigkeit ist methodisch und technisch anspruchsvoll. Die Interpretation von Messwerten ist durchaus noch problematisch.
- d) Bevorzugtes Verfahren zur Erhebung hydraulischer Eigenschaften sind Packertests. Bei geringer Wasserdurchlässigkeit des geprüften Gesteinskörpers haben die ermittelten Werte nur geringe räumliche Repräsentativität.
- e) Daten und Erkenntnisse zu Gesteinstypen mit geringer Durchlässigkeit, wie sie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gesucht werden, liegen bis heute nur in deutlich geringerem Umfang vor. Sie stammen überwiegend aus der Untersuchung von Standorten für Deponien für "herkömmliche" und radioaktive Abfälle. Sie betreffen bislang noch relativ wenige Gesteinstypen und nur wenige Gesteinskörper mit überwiegend geringer Tieflage.
- f) Umfangreiche Datensätze aus anderen Anwendungsbereichen, insbesondere der Erdöl/Erdgas-Exploration und -Erschließung, liegen vor, sind aber mit anderer Zielsetzung und oft mit anderer Technik erhoben worden und mit den Daten aus anderen Bereichen nicht ohne wei-

teres vergleichbar. Darüber hinaus sind Daten aus In-situ-Untersuchungen kaum veröffentlicht bzw. stehen nur zu einem geringen Teil für die Auswertung zur Verfügung.

- g) Die für einen bestimmten Gesteinstyp charakteristischen Werte überdecken erhebliche Bandbreiten. Die Bandbreiten verschiedener Gesteinstypen können sich weit überlappen.
- h) Erfahrungsbasierte Zuordnungen von Bandbreiten der Wasserdurchlässigkeit bzw. des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens zu bestimmten Gesteinstypen, insbesondere in Lehrbüchern, stammen bis heute überwiegend aus der wasserwirtschaftlichen Grundwasserschließung. Die zugrunde liegenden Daten betreffen vor allem relativ gut durchlässige Gesteine in Nähe der Erdoberfläche.
- i) Die Daten zu einem Gesteinstyp betreffen in der Regel Gesteinskörper aus unterschiedlichen Tiefen. Flachgründige Gesteinskörper eines bestimmten Gesteinstyps können (müssen aber nicht) höhere Wasserdurchlässigkeit aufweisen als tief liegenden Gesteinskörper, weil sie entlastungsbedingte Entspannungsfugen aufweisen.
- j) Tektonisch stark beanspruchte Gesteinskörper können (müssen aber nicht immer) höhere Wasserdurchlässigkeit als tektonisch nicht oder wenig beanspruchte Gesteinskörper aufweisen.

Für die Beurteilung der Datenqualität sind vor allem die unter a) bis h) genannten Zusammenhänge bedeutsam. Darauf wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Die unter i) und j) genannten Aspekte können dagegen erst in Phase 2 bearbeitet werden.

## **5.2 Formale Beurteilung**

Alle im Anhang zusammen gestellten Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit sind mit Verfahren erhoben worden, die nach den Ausführungen in 3.6 grundsätzlich als zuverlässig angesehen werden können. Auch die Vergleichbarkeit der Daten ist weitgehend gewährleistet; denn die meisten Daten sind mit Packertests erhoben worden. Die gemeinsame Auswertung der Daten ist daher gerechtfertigt.

Aussagen über die Zuverlässigkeit von Einzelwerten sind jedoch nicht möglich, da die ausgewerteten Quellen nur ausnahmsweise die dazu erforderlichen Angaben enthalten.

## 5.3 Inhaltliche Beurteilung

Die inhaltliche Beurteilung der im Anhang zusammen gestellten Daten im Hinblick auf ihre Verwendung für die Kriterienableitung bezieht sich im wesentlichen auf die Gebirgsdurchlässigkeit (s. 5.3.1). In 5.3.2 wird die Bedeutung des Speicherkoeffizienten dargestellt. Die Diskussion der Ergebnisse einiger Tracerversuche in 5.3.3 dient dazu, die Aussagekraft der  $k_f$ -Werte abzusichern.

### 5.3.1 Gebirgsdurchlässigkeit

Bei der inhaltlichen Prüfung der Daten im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit für die Ableitung von Kriterien zur Beurteilung der Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinen anhand des Gesteinstyps werden folgende Aspekte betrachtet:

- die Bandbreite der Werte für einzelne Gesteinstypen,
- die Durchlässigkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Gesteinstypen,
- die Abhängigkeit der Durchlässigkeitsbeiwerte von der Tiefe des Messortes unter der Erdoberfläche, wobei sich die Tiefenangaben auf die mittlere Testtiefe beziehen.

Für die Durchlässigkeit wird hier einheitlich der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert in m/s) gewählt, da bei den Versuchsauswertungen überwiegend die Gültigkeit des Gesetzes von DARCY angenommen wird. Im Gegensatz zur Transmissivität ist der  $k_f$ -Wert nicht auf eine bestimmte Grundwassermächtigkeit bzw. Länge des Testintervalls bezogen und daher für Vergleiche von Testdaten mit unterschiedlichen Testintervallen besser geeignet. Für weitergehende Untersuchungen werden aber auch Transmissivitäten und Intervalllängen betrachtet.

#### 5.3.1.1 Gesteinstypübergreifende Auswertung

Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die Bandbreiten aller bisher erfassten Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) derjenigen Gesteinstypen, zu denen bereits umfassende Datensätze vorliegen und ausgewertet worden sind. Dazu gehören die auch in Deutschland verbreiteten und grundsätzlich für die Endlagerung in Frage kommenden Gesteinstypen Ton und Tonstein (zusammengefasst als "Ton/Tonstein"), Mergelstein, Granit und Gneis. Zusätzlich sind die Daten für Tuffite vom Standort Sellafeld (Großbritannien) angegeben. Die unter diesem Begriff zusammengefassten Gesteinstypen kommen nach heutiger Einschätzung in Deutschland nicht in für die Endlagerung ausreichender Mächtigkeit vor (APPEL & KREUSCH 2000). Die Werte sind lediglich zum Vergleich in die Auswertung einbezogen worden. Als Vergleich dienen auch die  $k_f$ -Werte von Steinsalz am Standort Gorleben.

Zur graphischen Veranschaulichung der Unterschiede zwischen den Gesteinstypen werden sogenannte "Boxplots" verwendet. Sie erlauben den visuellen Vergleich der charakteristischen statisti-

schen Merkmale verschiedener Stichproben, hier die  $k_f$ -Werte für verschiedene Gesteinstypen (E-räuterung s. Abb. 5-1). Für die Boxplots wurden die Daten in zwei Stichproben unterteilt:

- Daten aus allen Tiefenbereichen,
- Daten aus dem Tiefenintervall zwischen 300 m und 1100 m unter Geländeoberfläche.

Das Tiefenintervall zwischen 300 m und 1100 m unter Geländeoberfläche ist auch in den Abb. 5-3 bis 5-7 gekennzeichnet. Es deckt denjenigen Bereich ab, innerhalb dessen die Errichtung eines Endlagers aus Gründen der Langzeitsicherheit und des sicheren Betriebs grundsätzlich möglich erscheint. Die obere Grenze ergibt sich nicht zuletzt aus den hohen Durchlässigkeitswerten für Ton/Tonstein in geringen Tiefen (s. 5.3.1.2). Mangels allgemein gültiger Vorgaben wurde die untere Grenze für die Auswertung (letztlich willkürlich) festgelegt. Eine Verschiebung dieser Grenze um einige hundert Meter hat - zumindest beim gegenwärtigen Datenstand - auf das Auswertungsergebnis keinen Einfluss.

Gesteinstyp	Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Mess- werte	$k_f$ -Werte (m/s)		
			Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Granit	50 - 1700	600	2,23E-15 - 4,00E-04	1,25E-06	4,05E-08
Gneis	15 - 3370	310	1,00E-13 - 1,57E-05	2,98E-07	2,35E-09
Tuffit	480 - 1520	112	5,00E-16 - 5,45E-06	7,27E-08	1,03E-12
Ton/Tonstein	5 - 1060	591	5,50E-15 - 8,45E-05	3,73E-06	1,10E-06
Mergelstein	70 - 1850	111	9,62E-14 - 1,30E-05	1,57E-07	3,46E-10
Steinsalz	900 - 1000	10	1,20E-14 - 6,00E-13	1,46E-13	1,20E-13

Tabelle 5-1 Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen \*)

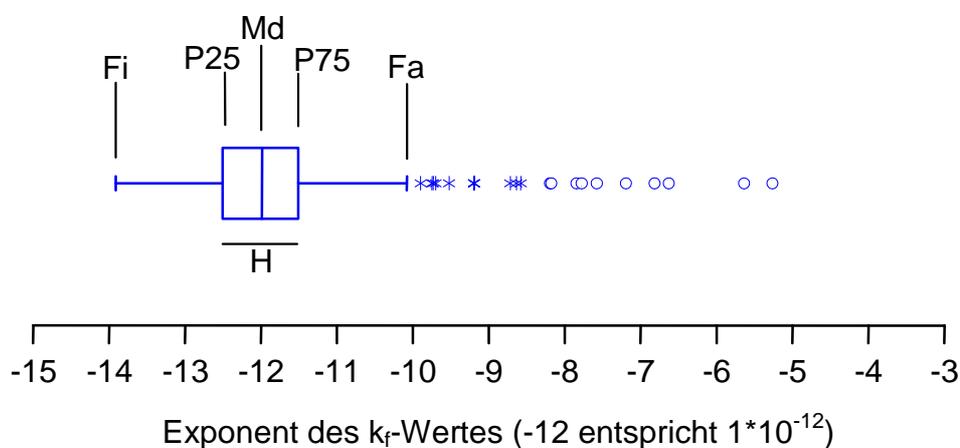
Die Messwerte der durch größeren Stichprobenumfang gekennzeichneten Gesteinstypen weisen durchaus ähnliche Bandbreiten der  $k_f$ -Werte von mindestens acht Größenordnungen auf.

Die Minimal- und Maximalwerte sind mit  $5 \cdot 10^{-16}$  bis  $1 \cdot 10^{-13}$  bzw.  $2 \cdot 10^{-7}$  bis  $4 \cdot 10^{-4}$  überraschend ähnlich. Entsprechendes gilt für die Mittelwerte, die sich lediglich um gut eine Größenordnung unterscheiden. Die Mittelwerte liegen näher an den Maximal- als an den Minimalwerten. Für die Medianwerte gilt das nicht in demselben Ausmaß. Die Unterschiede zwischen den Medianwerten der Gesteinstypen sind deutlich größer. Die Werte sind zudem bei der Mehrzahl der Gesteinstypen

\*) Die Durchlässigkeitswerte in allen Tabellen sind aus Excel-Tabellen übernommen und haben daher "E-Format":  $1,10E-0,6 = 1,1 \cdot 10^{-6}$

deutlich kleiner als die Mittelwerte. Die Unterschiede zwischen Mittelwerten und Medianwerten sind ein erster Hinweis darauf, dass die großen Bandbreiten der Werte nicht durch einzelne besonders niedrige, sondern eher durch einzelne hohe Werte verursacht werden.

Überraschenderweise weist die Gruppe Ton/Tonstein den höchsten Mittelwert und den höchsten Medianwert unter den dargestellten Gesteinstypen auf. Wertet man die Ergebnisse differenziert nach verschiedenen Tiefenbereichen aus, so ergibt sich allerdings ein anderes Bild (s. Abb. 5-2 u. 5.3.1.2).



Md	Medianwert (50-Prozent-Perzentil)	H	$P75 - P25$
P25	25-Prozent-Perzentil	Fi	$P25 - (1,5 * H)$
P75	75-Prozent-Perzentil	Fa	$P75 + (1,5 * H)$
*	$<Fi$ , aber $>[P25 - (3 * H)]$ oder $>Fa$ , aber $<[P75 + (3 * H)]$		
o	$<[P25 - (3 * H)]$ oder $>[P75 + (3 * H)]$		

Abb. 5-1 Erläuterung der Elemente von Boxplots

Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Gesteinstypen werden in Abb. 5-2 besonders deutlich: Bei der gemeinsamen Auswertung aller Daten fällt auf, dass mehr als 50 % aller Werte für Ton/Tonstein in einen auffällig hohen Bereich der  $k_f$ -Werte fallen. Der Medianwert ist höher als bei allen anderen Gesteinsgruppen. Der Vergleich mit den Werten aus dem Tiefenbereich zwischen 300 m und 1100 m unter Geländeoberfläche macht den Einfluss der Messtiefe auf die  $k_f$ -Werte deutlich. Er ist bei Ton/Tonstein besonders auffällig.

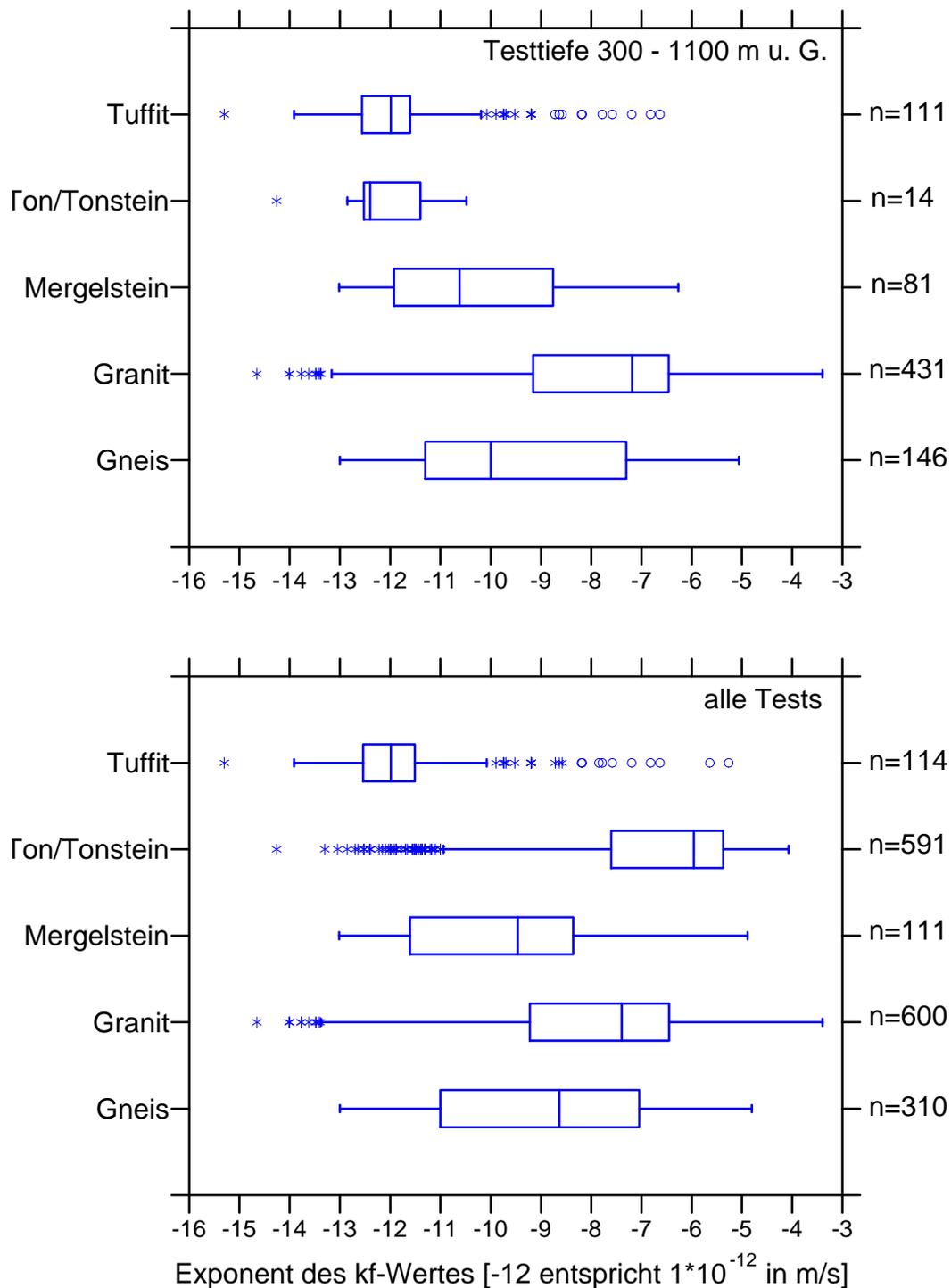


Abb. 5-2 Boxplots zum Vergleich der statistischen Verteilungen der kf-Werte verschiedener Gesteinstypen  
 unten: alle Werte,  
 oben: Werte aus dem Tiefenbereich 300-1100 m unter Geländeoberfläche  
 n: Anzahl der Werte in der Stichprobe

### 5.3.1.2 Ton/Tonstein

Über den gesamten dokumentierten Tiefenbereich betrachtet ist die Spannweite der  $k_f$ -Werte bei Ton/Tonstein sehr groß (Tab. 5-1). Die vorliegenden Daten können aber nach der mittleren Testtiefe in zwei Klassen unterteilt werden. Nach vorläufiger statistischer Auswertung liegt die Klassengrenze bei knapp 200 m unter Geländeoberfläche. Bei differenzierter Betrachtung der Klassen mit mittleren Testtiefen  $>200$  m und  $<200$  m unter Geländeoberfläche ergibt sich folgendes Bild:

- Bei Testtiefen bis 200 m unter Geländeoberfläche reicht die Spannweite der  $k_f$ -Werte insgesamt von  $10^{-12}$  bis  $10^{-5}$  m/s, die Mittelwerte für die einzelnen Datensätze zwischen  $10^{-5}$  und  $10^{-7}$  m/s (Tab. 5-2). Nur unter dem Gesichtspunkt Gebirgsdurchlässigkeit betrachtet kommen offenbar Ton und Tonstein in geringen Tiefen für die Endlagerung nicht in Frage.
- In Tiefen über 200 m unter Geländeoberfläche sind die  $k_f$ -Werte mit  $10^{-15}$  bis  $10^{-11}$  m/s, ihre Bandbreiten und die Mittelwerte für die einzelnen Datensätze mit  $10^{-13}$  bis  $10^{-11}$  m/s deutlich niedriger als in den flacheren Bereichen. Die Unterschiede zwischen Mittelwerten und Medianwerten sind gering (Tab. 5-3).

In Abb. 5-3 sind die Einzelwerte gegen die Testtiefe aufgetragen. Die starke diskontinuierliche Tiefenabhängigkeit der  $k_f$ -Werte ist danach nicht auf bestimmte Standorte beschränkt.

Den Ursachen für die Tiefenabhängigkeit wurde im einzelnen noch nicht nachgegangen. Infrage kommen beispielsweise die Entstehung von Trennfugen durch Entlastung des Gebirges infolge Erosion überlagernder Gesteinsschichten und/oder durch Abschmelzen eiszeitlicher Eismassen sowie tektonische Effekte. Bei den beiden deutschen Unterkreide-Standorten Hoheneggelsen und Münchehagen sind (zusätzlich) andere Ursachen wirksam. Am Standort Hoheneggelsen sind hohe Gebirgsdurchlässigkeiten vornehmlich an einen bestimmten Gesteinstyp ("Blättertton") gebunden. Am Standort Münchehagen ist die im Vergleich zu anderen Unterkreide-Tonsteinen durchgängig auffällig hohe Durchlässigkeit Folge von Gesteins Erwärmung durch einen nahen Magmenherd und deren Auswirkungen auf die Tonmineral-Zusammensetzung und damit auch die mechanischen Gesteinseigenschaften zurück zu führen.

### 5.3.1.3 Mergelstein

Wie bei Ton/Tonstein weisen auch die Durchlässigkeitsbeiwerte für Mergelstein eine große Spannweite auf (Tab. 5-4 u. Abb. 5-2). Im Gegensatz zu Ton/Tonstein werden aber auch in größeren Tiefen unter Geländeoberfläche höhere Durchlässigkeiten mit  $k_f$ -Werten über  $10^{-7}$  m/s (Tiefenbereich 800 m bis 1200 m) bzw. über  $10^{-8}$  m/s (Tiefenbereich 1200 m bis 1850 m) angetroffen. Bereits in relativ geringer Tiefe können aber auch bereits sehr niedrige Werte auftreten, wie die Mergelsteine am Standort Tournemire (Frankreich) zwischen 330 m und 390 m Tiefe unter Geländeoberfläche mit nur noch geringer Gebirgsdurchlässigkeit von  $10^{-12}$  bis  $10^{-11}$  m/s belegen. Die Daten

Stratigraphische Herkunft	Lokation	Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	k <sub>f</sub> Werte(m/s)		
				Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Unterkreide	Hoheneggelsen	5 - 90	118	2,20E-11 - 4,70E-05	1,51E-06	2,55E-08
Unterkreide	Münchehagen	5 - 90	377	7,00E-11 - 8,45E-05	5,28E-06	2,52E-06
Dogger	Schwäbische Alb	20 - 60	41	6,67E-12 - 2,63E-06	2,79E-07	4,76E-10
Lias	Asse	100 - 130	2	8,50E-06 - 1,40E-05	1,13E-05	1,13E-05

Tabelle 5-2 Gebirgsdurchlässigkeit von Ton/Tonstein in Tiefen kleiner als 200 m unter Geländeoberfläche

Stratigraphische Herkunft	Lokation	Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	k <sub>f</sub> -Werte (m/s)		
				Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Tertiär	Belgien, Mol, Hades	200 - 250	23	1,05E-12 - 1,15E-11	3,68E-12	3,24E-12
Lias	Frankreich, Tournemire	230 - 400	13	2,30E-13 - 2,33E-11	5,14E-12	1,33E-12
Tertiär	Spanien, Duro	420 - 550	3	1,30E-12 - 3,30E-11	1,84E-11	2,10E-11
Dogger	Schweiz, Schafisheim, Weiach	550 - 1060	5	5,50E-15 - 3,00E-13	2,09E-13	3,00E-13

Tabelle 5-3 Gebirgsdurchlässigkeit von Ton/Tonstein in Tiefen über 200 m unter Geländeoberfläche (Belgien: Ton der Boom-Formation, übrige: Tonstein)

Stratigraphische Herkunft	Lokation	Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	k <sub>f</sub> Werte (m/s)		
				Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Palfris-Formation	Schweiz, Weltenberg	70 - 800	82	1,63E-13 - 1,30E-05	2,02E-07	4,32E-10
Palfris-Formation	Schweiz, Weltenberg	800 - 1200	14	9,62E-14 - 5,40E-07	6,26E-08	2,88E-11
Palfris-Formation	Schweiz, Weltenberg	1200 - 1850	10	1,04E-12 - 3,20E-08	3,36E-09	1,97E-11
Lias	Frankreich, Tournemire	330 - 390	5	4,10E-12 - 3,00E-11	1,52E-11	1,10E-11
	Gesamt	70 - 1850	111	9,62E-14 - 1,30E-05	1,57E-07	3,46E-10

Tabelle 5-4 Gebirgsdurchlässigkeit von Mergelstein

vom Standort Wellenberg (Schweiz) zeigen eine leichte Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe. Die Spannweite der  $k_f$ -Werte bleibt aber hoch (Abb. 5-4).

### 5.3.1.4 Gneis

Die höchsten Gebirgsdurchlässigkeiten für Gneis ( $10^{-5}$  m/s) wurden im Schwarzwald-Kristallin im Tiefenbereich von 15 m bis 510 m angetroffen (Tab. 5-5). Im Kristallin der Nordschweiz sind in Tiefen von mehr als 1000 m unter Geländeoberfläche noch Durchlässigkeitsbeiwerte  $>10^{-6}$  m/s ermittelt worden. Erhöhte Durchlässigkeiten sind auch in großer Tiefe (um 3350 m) in der Tiefbohrung Urach 3 aufgetreten ( $10^{-7}$  m/s). Abgesehen von diesen Extremwerten ist insgesamt eine gewisse Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe festzustellen: Die Häufigkeit niedriger Durchlässigkeitsbeiwerte nimmt mit der Tiefe zu, hohe Durchlässigkeiten treten aber weiterhin auf (Abb. 5-5).

Bei einigen Lokationen sind die ermittelten  $k_f$ -Werte relativ niedrig und weisen zudem eine geringe Bandbreite auf (Tab. 5-5: Sternö, KTB-VB, Urach). Die Anzahl der Messwerte pro Lokation ist in diesen Fällen jedoch so gering, dass Aussagen über eine mögliche Ortsabhängigkeit der Werte nicht gerechtfertigt möglich sind.

Lokation	Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	$k_f$ -Werte (m/s)		
			Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Deutschland, Schwarzwald	15 - 510	86	3,50E-10 - 1,57E-05	7,88E-07	8,91E-08
Schweden, Sternö	240 - 370	10	1,30E-10 - 6,10E-08	1,60E-08	7,35E-09
Nord-Schweiz	350 - 1500	191	1,00E-13 - 4,00E-06	1,23E-07	3,00E-11
Deutschland, KTB-VB	630	3	4,40E-11 - 2,90E-10	1,68E-10	1,70E-10
Deutschland, KTB-VB	2200	4	6,5E-13 - 9,9E-12	3,34E-12	1,40E-12
Deutschland, Urach 3	3350	16	7,61E-10 - 1,82E-07	5,46E-08	1,06E-08
Gesamt	15 - 3370	310	1,00E-13 - 1,57E-05	2,98E-07	2,35E-09

Tabelle 5-5 Gebirgsdurchlässigkeit von Gneis

### 5.3.1.5 Granit

Bei standortübergreifender Betrachtung ist bei den  $k_f$ -Werten für Granit keine Abhängigkeit von der Tiefe festzustellen. Für alle Tiefenbereiche gelten vielmehr ähnliche Bandbreiten sowie Mittelwerte ( $10^{-7}$  m/s, Tab. 5-7 u. Abb. 5-6). Zwischen den einzelnen Standorten bestehen dagegen erhebliche

Unterschiede: Relativ niedrige Durchlässigkeitswerte finden sich an den Standorten Stripa (Schweden) mit  $10^{-11}$  m/s, Lac di Bonnet (Kanada) mit  $10^{-11}$  m/s und Grimsel (Schweiz, Ventilationsversuch) mit  $10^{-12}$  m/s. Relativ hohe Durchlässigkeitsbeiwerte treten an den Standorten Grimsel (Schweiz, Standort Bohrlochkranzversuch) mit  $10^{-7}$  m/s, Loviisa (Finnland) mit  $10^{-7}$  bis  $10^{-6}$  m/s, Schwarzwald (Deutschland) mit  $10^{-7}$  m/s, Nordschweiz mit  $10^{-6}$  m/s und Tono, Kamaishi (Japan) mit  $10^{-7}$  m/s auf (Tab. 5-6).

Lokation	Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	k <sub>f</sub> -Werte (m/s)		
			Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Schweiz, Grimsel	400	155	1,81E-08 - 6,71E-06	4,51E-07	2,71E-07
Schweiz, Grimsel <sup>*)</sup>	400	32	1,50E-13 - 4,62E-11	8,16E-12	4,31E-12
Finnland, Loviisa	20 - 190	5	2,00E-09 – 1,10E-06	3,51E-07	2,10E-07
Deutschland, Schwarzwald	50 - 135	5	8,70E-08 – 1,36E-06	7,91E-07	2,10E-07
Nord-Schweiz	430 - 1700	57	1,00E-13 - 4,00E-04	7,46E-06	1,20E-08
Kanada, Lac di Bonnet	50 - 880	45	2,23E-15 – 2,41E-10	1,00E-11	2,03E-13
Finnland, Hästholmen	210 - 950	78	1,30E-09 – 8,50E-05	2,52E-06	2,25E-07
Schweden, Stripa	335	3	6,30E-11 – 6,50E-11	6,43E-11	6,50E-11
Japan, Tono, Kamaishi	200 - 1000	220	1,00E-12 - 7,50E-06	2,44E-07	7,00E-09
Gesamt	50 - 1700	600	2,23E-15 - 4,00E-04	1,25E-06	4,05E-08

Tabelle 5-6 Gebirgsdurchlässigkeit von Granit nach Standorten

\*) Granit/Granodiorit

Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	k <sub>f</sub> -Werte (m/s)		
		Spannweite	Mittelwert	Medianwert
20-200	19	1,16E-13 - 1,36E-06	3,01E-07	2,00E-09
201-400	351	9,81E-15 - 8,50E-05	8,08E-07	1,20E-07
401-600	92	2,23E-15 - 4,00E-04	4,52E-06	2,00E-09
601-800	50	3,26E-14 - 8,50E-06	2,17E-07	2,00E-09
801-1000	50	9,81E-15 - 4,00E-06	4,55E-07	2,25E-08
1000-1700	38	1,00E-13 - 5,00E-06	3,25E-07	2,15E-09

Tabelle 5-7 Gebirgsdurchlässigkeit von Granit nach Tiefenbereichen

Die Befunde von den beiden Grimsel-Lokationen deuten auf eine engräumige Durchlässigkeitsvariabilität im lokalen Maßstab hin. Über die Ausdehnung von Gebieten mit - hinsichtlich der Durchlässigkeit - einheitlichen Werten lassen die Daten ansonsten keine Aussage zu.

### 5.3.1.6 Tuffit

Im Vergleich mit den anderen Gesteinstypen, selbst mit Steinsalz, sind die gemessenen Minimalwerte der Gebirgsdurchlässigkeit für die Tuffite und Sedimente der Borrowdale Volcanic Group am Standort Sellafield (Großbritannien) insgesamt und für Tiefenbereiche bis 800 m unter Geländeoberfläche mit  $5 \cdot 10^{-16}$  m/s auffällig niedrig (Tab. 5-8). Der im Vergleich zu den Medianwerten geringe Abstand zwischen Mittelwerten und Maximalwerten deutet auf einige relativ hohe Durchlässigkeitswerte hin.

Aus größeren Tiefen liegen nur Einzelwerte vor. Sie lassen mit Werten im oberen Bereich der Bandbreite für geringere Tiefen eine Abnahme der Durchlässigkeit mit der Tiefe nicht erkennen.

Tiefenbereich (m u.G.)	Anzahl Messwerte	k <sub>f</sub> -Werte (m/s)		
		Spannweite	Mittelwert	Medianwert
alle Bereiche	112	5,00E-16 - 2,35E-07	4,77E-09	1,03E-12
480 – 800	107	5,00E-16 - 1,53E-07	2,44E-09	9,62E-13
870 – 985	4	2,00E-10 - 2,35E-07	6,46E-08	1,17E-08
1520	1	1,43E-08		

Tabelle 5-8 Gebirgsdurchlässigkeit von Tuffit an der Lokation Sellafield, Großbritannien

### 5.3.2 Der Speicherkoeffizient

Das durchflusswirksame Hohlraumvolumen bzw. die effektive Porosität kann nicht direkt mit In-situ-Versuchen erhoben werden. Näherungsweise kann dafür aber der Speicherkoeffizient eingesetzt werden (Kap. 2.4). Der Speicherkoeffizient (S) ist durch Einbohrloch-Druckversuche (Slug-, DST-, Pulse- und WD-Tests) und Fluid-Logging allerdings nicht genau bestimmbar, sondern kann höchstens abgeschätzt werden. LEECH et al. (1984) schätzen die Fehlerbreite auf über zwei Größenordnungen und haben daher auf die Angabe von Speicherkoeffizienten in der Sondierbohrung Böttstein (Schweiz) verzichtet.

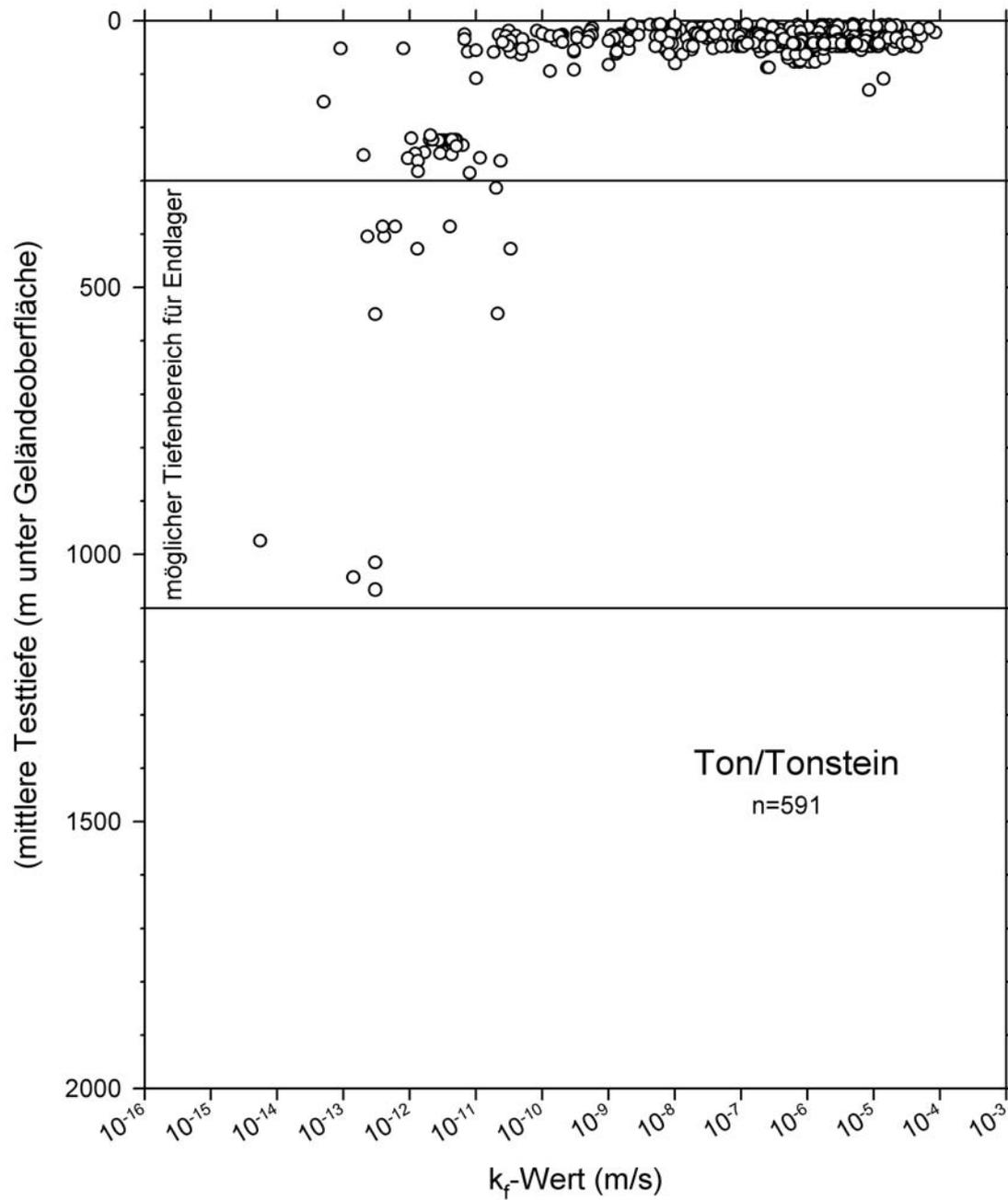


Abb. 5-3 Tiefenabhängige Verteilung der  $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Ton/Tonstein (n: Anzahl der Werte in der Stichprobe)

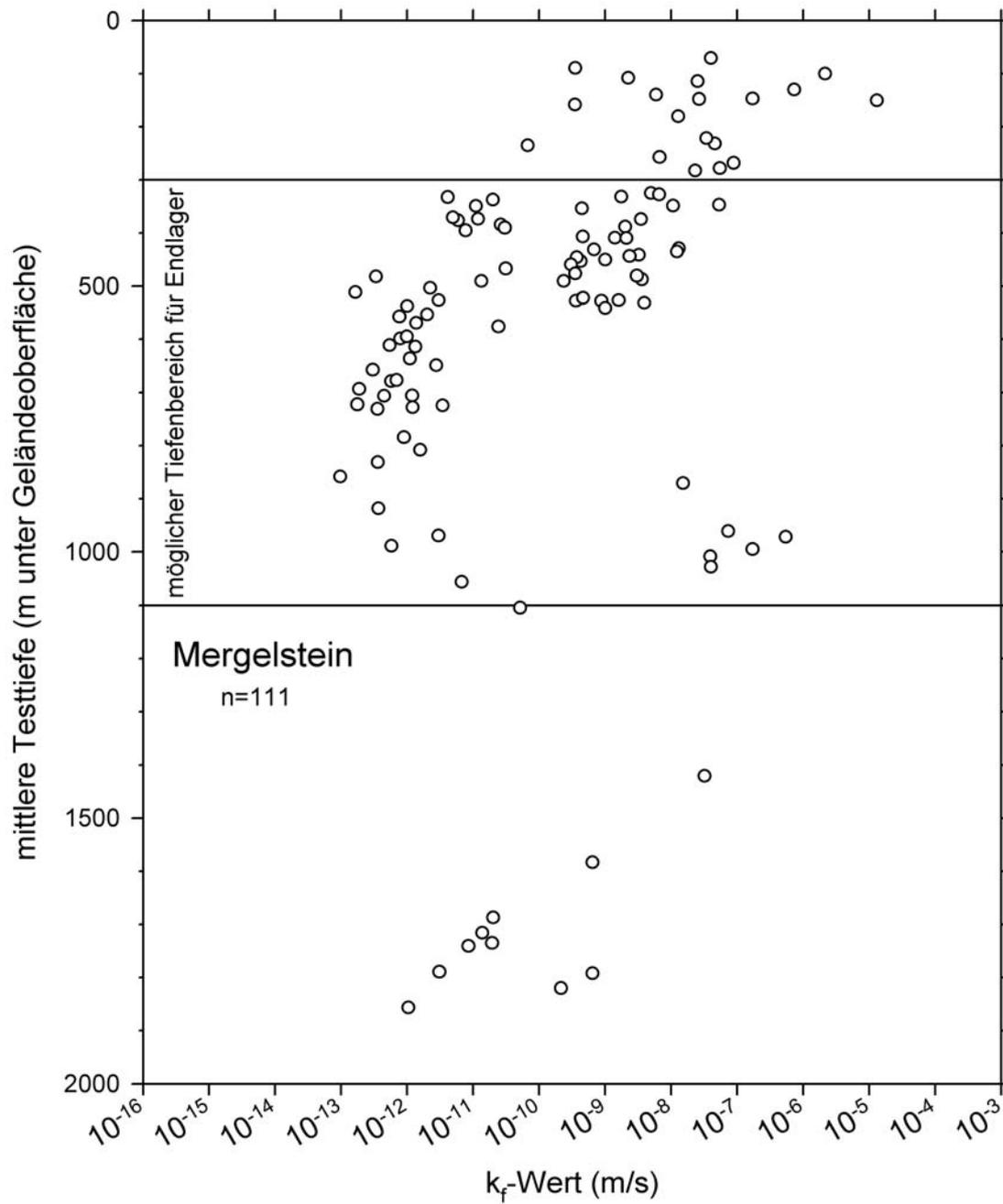


Abb. 5-4 Tiefenabhängige Verteilung der  $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Mergelstein (n: Anzahl der Werte in der Stichprobe)

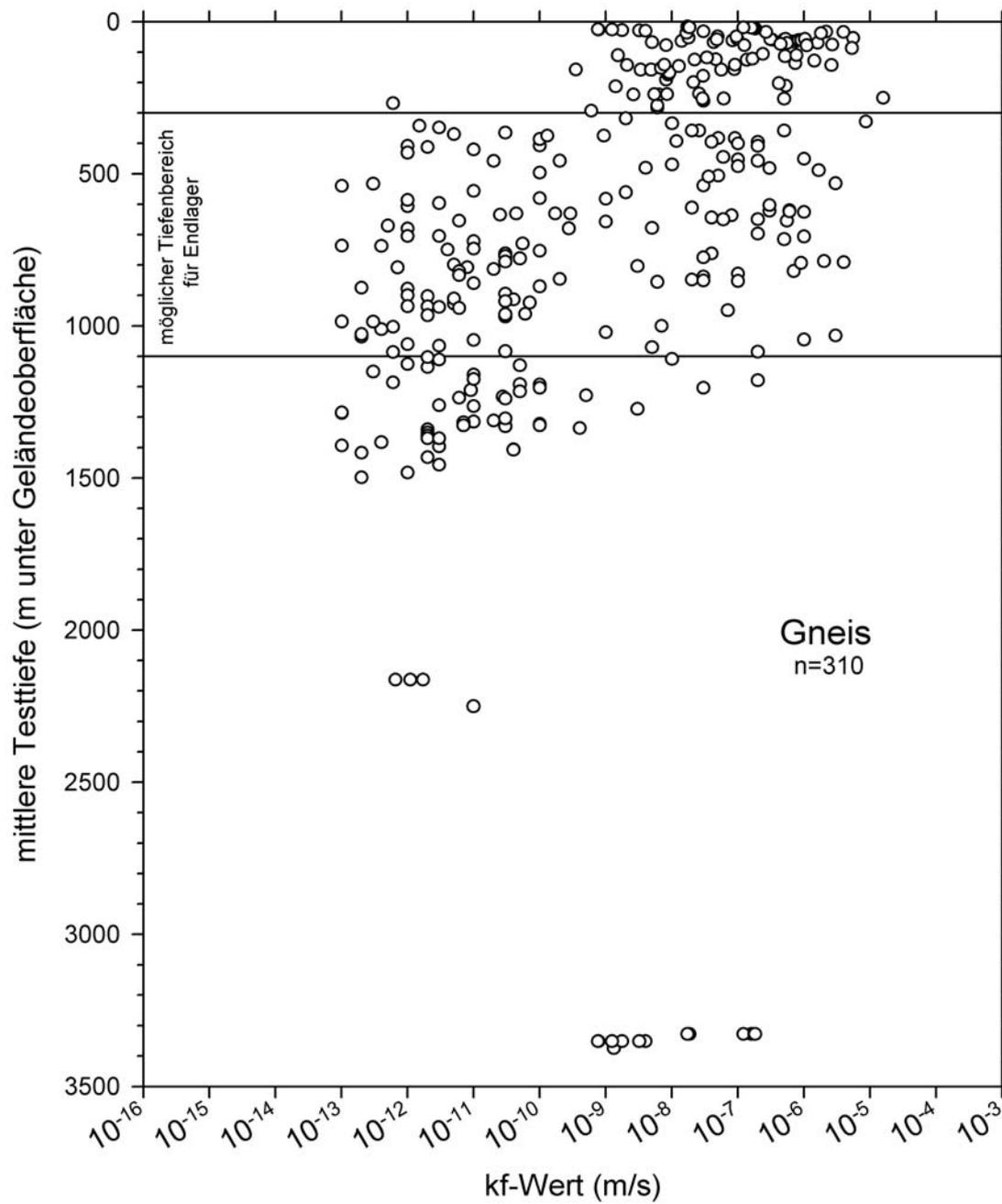


Abb. 5-5 Tiefenabhängige Verteilung der  $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Gneis  
(n: Anzahl der Werte in der Stichprobe)

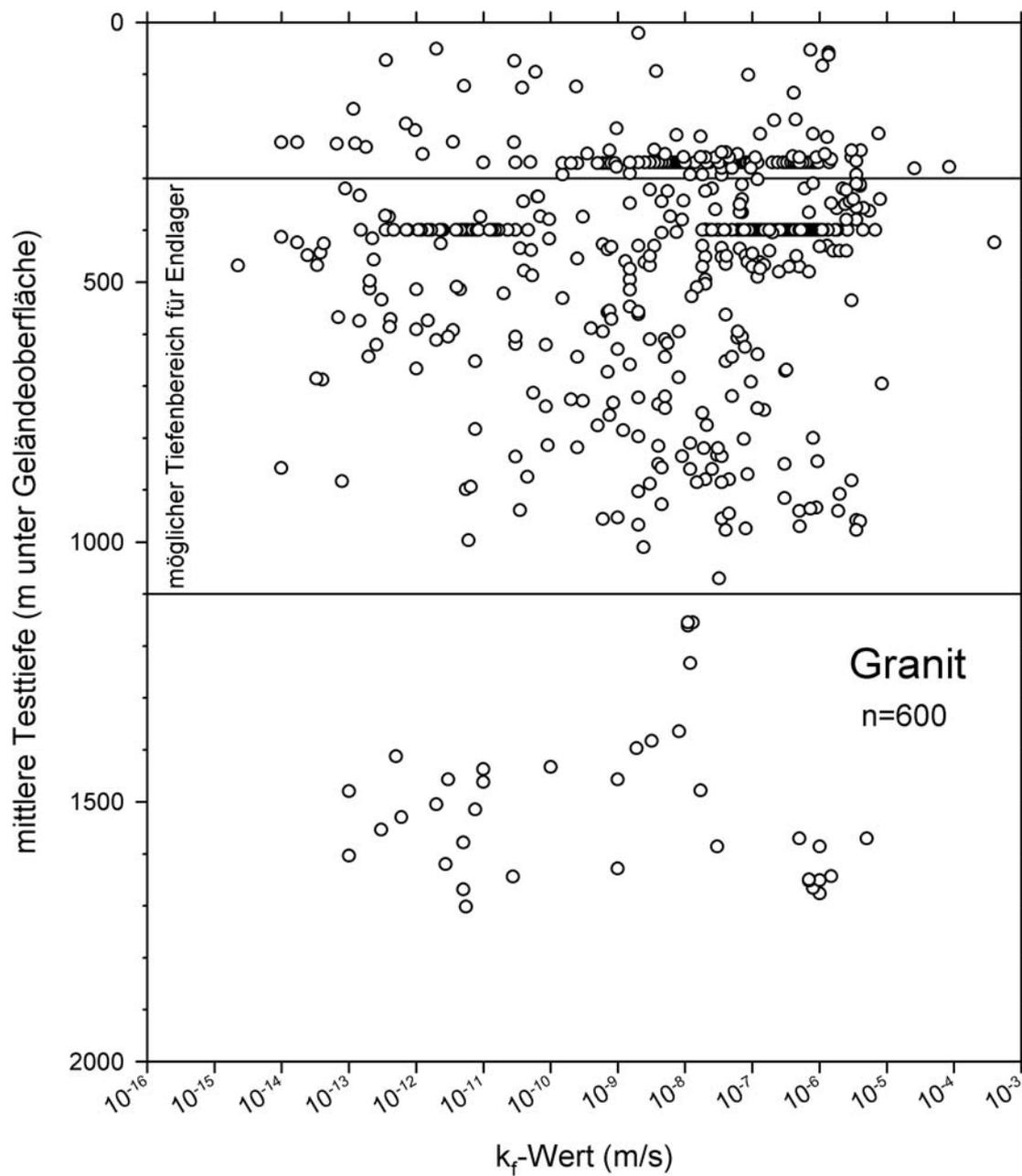


Abb. 5-6 Tiefenabhängige Verteilung der  $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Granit  
(n: Anzahl der Werte in der Stichprobe)

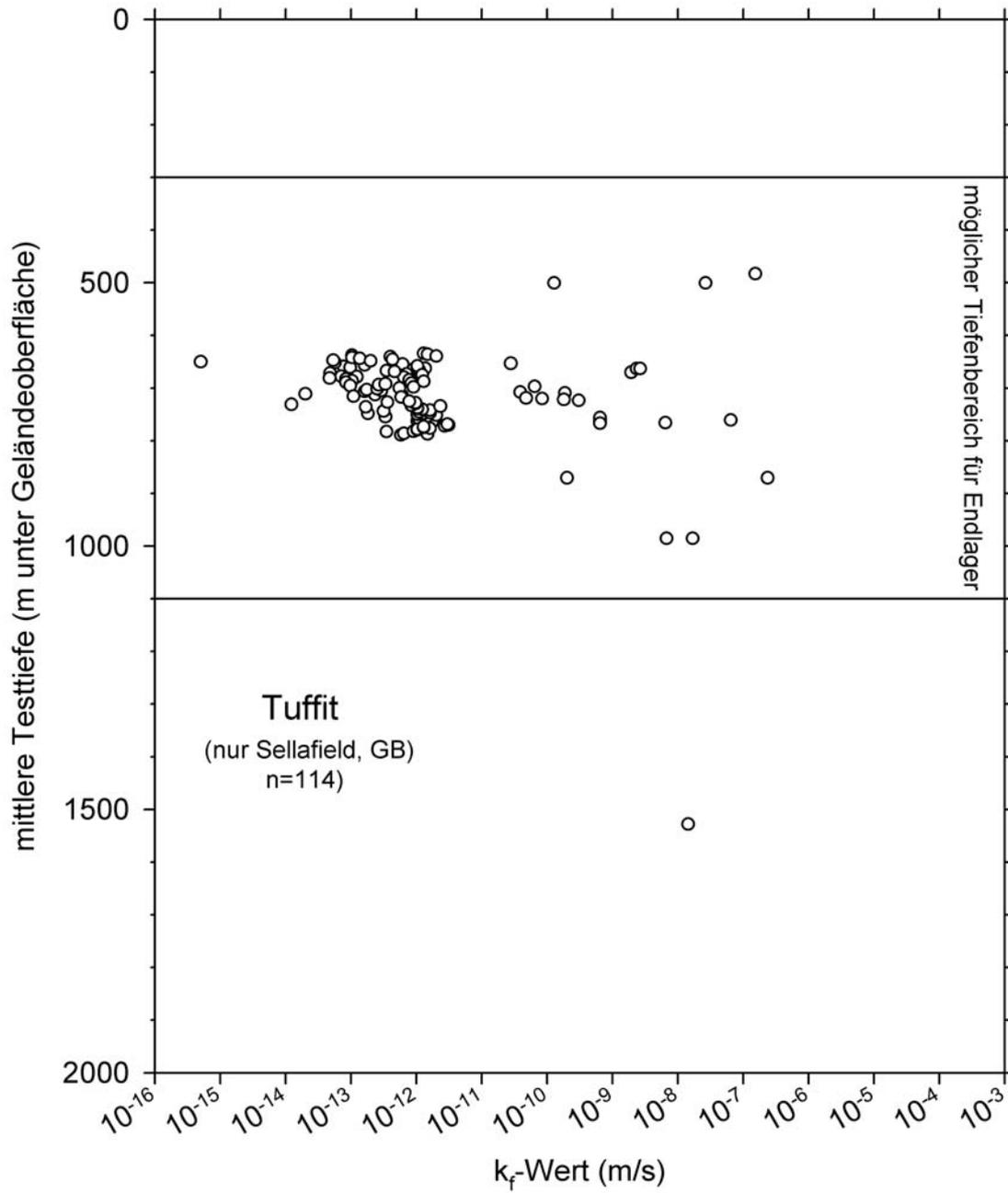


Abb. 5-7 Tiefenabhängige Verteilung der  $k_f$ -Werte des Gesteinstyps Tuffit  
(n: Anzahl der Werte in der Stichprobe)

Für eine genaue Bestimmung dieses Parameters eignen sich Langzeitpumpversuche mit Piezometerüberwachung (HEKEL, 1992). Wird, wie z.B. beim Fluid-Logging, der Speicherkoeffizient zur Berechnung der Transmissivität benötigt, muss er aus Labordaten abgeleitet werden (GUYONNET et al., 1993). Sensitivitätsanalysen zeigen, dass bei höheren Durchlässigkeiten ( $k_f$ -Werte etwa  $10^{-6}$  bis  $10^{-8}$  m/s) über den Speicherkoeffizienten berechnete  $k_f$ -Werte relativ wenig sensitiv gegenüber S-Variationen sind. Bei geringen Durchlässigkeiten ( $k_f$ -Werte etwa  $10^{-11}$  bis  $10^{-12}$  m/s) variiert der  $k_f$ -Wert dagegen um eine Größenordnung bei einer S-Variation von zwei Größenordnungen (MOE et al., 1990).

Tabelle 5-9 gibt einen Überblick über die Verteilung der erfassten Werte des spezifischen Speicherkoeffizienten (Ss). Der spezifische Speicherkoeffizient wurde gewählt, da er nicht wie der Speicherkoeffizient (S) auf eine bestimmte Mächtigkeit bezogen ist. Insgesamt liegen ca. 450 Werte vor mit einer Spannweite von  $10^{-9}$  bis  $10^{-4}$ . Bezogen auf einzelne Gesteinstypen liegen die Minimalwerte einheitlich bei ca.  $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$ , die Maximalwerte erreichen bei Ton/Tonstein die höchsten Werte. Werden Tiefenklassen gebildet so ist insgesamt eine leichte Abnahme der Ss-Werte mit zunehmender Tiefe festzustellen. Bei Ton/Tonstein ist diese Abnahme am stärksten ausgeprägt:  $10^{-5}$  in Tiefen <200 m und  $10^{-7}$  in Tiefen >200 m unter Geländeoberfläche. Wegen einer zu geringen Anzahl von Werten sind Mergelstein und Tuffit nicht berücksichtigt.

Gesteinstyp	Tiefenbereich (m u. G.)	Anzahl Messwerte	Spezifischer Speicherkoeffizient Ss		
			Spannweite	Mittelwert	Medianwert
<b>Ton/Tonstein</b>	<b>20 – 1060</b>	<b>29</b>	<b>1,42E-08 – 3,79E-04</b>	<b>3,20E-05</b>	<b>4,80E-06</b>
Ton/Tonstein	< 200<200	16	1,18E-06 - 3,79E-04	5,71E-05	1,64E-05
Ton/Tonstein	> 200>200	13	1,42E-08 - 5,50E-06	9,93E-07	1,70E-07
<b>Mergelstein</b>	<b>330 - 380</b>	<b>4</b>	<b>8,50E-08 – 9,90E-08</b>	<b>9,28E-08</b>	<b>9,35E-08</b>
<b>Granit</b>	<b>400 - 1700</b>	<b>205</b>	<b>1,49E-09 – 3,05E-05</b>	<b>2,78E-06</b>	<b>8,14E-07</b>
Granit	400 – 800	168	1,49E-09 - 3,05E-05	3,33E-06	1,30E-06
Granit	>800 - 1700	37	2,20E-08 - 2,00E-06	2,57E-07	2,20E-07
<b>Gneis</b>	<b>250 - 3350</b>	<b>119</b>	<b>8,10E-09 – 3,65E-06</b>	<b>5,37E-06</b>	<b>2,20E-07</b>
Gneis	250 – 1500	108	2,10E-08 - 3,65E-06	2,46E-07	2,20E-07
Gneis	>1500 - 3350	11	8,10E-09 - 2,02E-06	2,44E-07	4,18E-08
<b>Tuffit</b>	<b>500 - 870</b>	<b>4</b>	<b>7,25E-09 – 1,65E-05</b>	<b>5,37E-06</b>	<b>2,48E-06</b>
Gesamt	20 – 3350	459	1,49E-09 - 5,00E-04	5,50E-06	2,68E-07

Tabelle 5-9 Spezifische Speicherkoeffizienten bei einzelnen Gesteinstypen in unterschiedlichen Tiefenbereichen

Die starke Unsicherheit bei der messtechnischen Ermittlung der Speicherkoeffizienten aus Packer-  
versuchen schränkt die Signifikanz der Speicherkoeffizienten für das durchflusswirksame Hohl-  
raumvolumen stark ein. Werden Fehlerbreiten von  $\pm$  zwei Größenordnungen angenommen, lassen  
sich kaum noch differenzierte Aussagen treffen. Beim jetzigen Stand der Untersuchung kommt der  
Speicherkoeffizient für die Entwicklung eines Kriteriums zur Beurteilung der Grundwasserbewe-  
gung daher nicht infrage. In Verbindung mit den ermittelten Durchlässigkeiten kann der Speicher-  
koeffizient aber zusätzliche Aussagen liefern. Z.B. kann ein geringer Speicherkoeffizient gepaart  
mit einem hohen Durchlässigkeitsbeiwert auf das Vorhandensein einzelner stark dominierender  
Klüfte hindeuten. In den weiteren Untersuchungsschritten soll darauf näher eingegangen werden.

### 5.3.3 Die Grundwasserfließgeschwindigkeit

Die aus dem Gesetz von DARCY abgeleitete fiktive Filtergeschwindigkeit gilt streng genommen nur  
für Porengrundwasserleiter. In Festgesteinen mit überwiegender Kluftdurchlässigkeit, wie sie in der  
vorgesehenen Endlagertiefe am ehesten zu erwarten sind, liefert die Filtergeschwindigkeit generell  
zu geringe Werte, da die Fließwege nicht gleichmäßig im Gestein verteilt sind. Sinnvolle Aussagen  
können dagegen aus geohydraulischen Markierungsversuchen erhalten werden. In gering durch-  
lässigen Gesteinen sind bisher allerdings nur wenige Versuche durchgeführt worden. Im Anhang  
sind die Ergebnisse von Markierungsversuchen an der Sonderabfalldeponie Münchehagen (s. Tab.  
DM1 u. DM2) und im Felslabor Grimsel (s. Tab. CHGT) dargestellt. Sie liefern folgendes Bild:

#### Münchehagen (Tonstein)

Länge der Teststrecke ca. 6 m, oberflächennah

Parallel der Hauptkluftrichtung:

$k_f$   $1,1 \cdot 10^{-4}$  m/s,  $V_a(\text{erst})$  1,26 bis 2,4 m/h,  $V_a(\text{max})$  0,04 bis 1,76 m/h

Senkrecht zur Hauptkluftrichtung:

$k_f$   $2,8 \cdot 10^{-5}$  m/s,  $V_a(\text{erst})$  0,25 m/h,  $V_a(\text{max})$  0,06 m/h

#### Grimsel (Zentraler Aaregranit)

Länge der Teststrecken 8 m bis 62 m, ca. 400 m Überdeckung

Mittlerer  $k_f$ -Wert um  $10^{-7}$  m/s,  $V_a(\text{erst})$  0,07 bis 30 m/h

$V_a(\text{erst})$ : Abstandsgeschwindigkeit errechnet nach der Erstankunftszeit des Travers

$V_a(\text{max})$ : Abstandsgeschwindigkeit errechnet nach aus dem Durchgang der maximalen Kon-  
zentration des Tracers

Die Abstandsgeschwindigkeiten am Standort Münchehagen deuten auf eine (auch durch die dort  
gemessenen  $k_f$ -Werte belegte) Richtungsabhängigkeit entsprechend der Kluftrichtung hin. Die Ab-

standsgeschwindigkeiten im Felslabor Grimsel variieren sehr stark bei ähnlichen mittleren Durchlässigkeiten.

Die Fließgeschwindigkeit in Kluffleitern ist sehr stark von der lokalen Kluffgeometrie abhängig und kann von Kluft zu Kluft, entsprechend z.B. ihrer Öffnungsweite und Rauigkeit, sehr unterschiedlich sein (s. Kap. 2.2). Entsprechend ihrer starken lokalen Bindung eignen sich für kurze Strecken erhobene Abstandsgeschwindigkeiten daher kaum für ein übergeordnetes Kriterium zur Beurteilung der Grundwasserbewegung. Sie können allerdings aufzeigen, ob in klüftigem Gestein auch in größeren Tiefen lokal schnelle Fluidverbindungen auftreten.

## 5.4 Zusammenfassende Bewertung

Die vorläufige Auswertung von Daten zur hydraulischen Durchlässigkeit aus In-situ-Messungen in unterschiedlichen Gesteinstypen, an verschiedenen Standorten in verschiedenen Tiefen und mit unterschiedlichen Methodenkombinationen ergibt insgesamt folgendes Bild:

Die meisten Durchlässigkeitsdaten werden mit **Packertests**, einem technisch ausgereiften und zuverlässigen Verfahren, erhoben. Sie sind daher aus technischer Sicht für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung grundsätzlich geeignet. Die räumliche Repräsentativität von Einzelwerten ist auf Grund der Kleinskaligkeit dieser Versuche in Gesteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit allerdings begrenzt. Für die Kriterienentwicklung kommt daher nur eine übergreifende Auswertung umfangreicher Datensätze in Frage.

Der vorliegende Datenbestand erlaubt bereits eine vorläufigen Beurteilung der Gesteinstypen Ton/Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis im Hinblick auf die **Gebirgsdurchlässigkeit**. Danach überschneiden sich die Bandbreiten der  $k_f$ -Werte dieser Gesteinstypen zwar über teilweise weite Bereiche, zwischen den Mittelwerten bzw. Medianwerten einiger Gesteinstypen bestehen jedoch deutliche Unterschiede (s. Abb. 5-2). Danach ist zu erwarten, dass die detaillierte statistische Auswertung eine signifikante Unterscheidung verschiedener Gesteinstypen nach ihrer Gebirgsdurchlässigkeit erlauben wird.

Wird die Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert in m/s) in Abhängigkeit von der Testtiefe (m unter Oberfläche) betrachtet, fallen die Gesteinstypen Tonstein und Granit besonders auf: Unabhängig vom Standort zeigen die  $k_f$ -Werte für Ton/Tonstein eine starke Abhängigkeit von der Tiefe. Die Mittelwerte für Messungen oberhalb einer Tiefe von 200 m unter Geländeoberfläche liegen zwischen  $10^{-5}$  und  $10^{-7}$  m/s, für Messungen unterhalb 200 m zwischen  $10^{-11}$  und  $10^{-13}$  m/s. Wahrscheinlich ist der Übergang zwischen den Werten für die beiden Tiefenbereiche diskontinuierlich. Bei den  $k_f$ -Werten für Granit ist dagegen keine Tiefenabhängigkeit festzustellen. Hier treten dagegen deutliche Durchlässigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Lokationen auf (s. Tab. 5-6).

---

In-situ-Daten zum **durchfluswirksamen Hohlraumvolumen** liegen nicht vor. Für den ersatzweise betrachteten Speicherkoeffizienten bzw. den spezifischen Speicherkoeffizienten sind ähnliche Zusammenhänge wie bei den Durchlässigkeitsdaten nicht erkennbar. Die Datenanzahl ist gering und viele Angaben sind lediglich Schätzwerte, die teilweise auf Daten aus Laborversuchen gründen. Auf dieser Basis erscheint die Entwicklung eines Kriteriums zur Grundwasserbewegung nicht sinnvoll. Die Detailanalyse der Werte kann aber im Einzelfall dazu beitragen, Beziehungen  $k_f$ -Werten und Hohlraumvolumen aufzudecken.

Die **Grundwasserfließgeschwindigkeit**, abgeleitet aus Tracerversuchen über kurze Strecken, kann auch innerhalb einer einzigen Bruchzone stark variieren und eignet sich daher nicht für die Ableitung eines gesteinspezifischen Kriteriums zu Grundwasserbewegung. Zudem liegen wegen des großen Aufwands der Versuche kaum Daten vor.

**Zusammenfassend** ist festzustellen, dass auch bei einer groben Untergliederung deutliche Durchlässigkeitsunterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinstypen erkennbar werden, obwohl die bestimmenden typspezifischen primären Charakteristika durch die Auswirkungen diagenetischer, tektonischer, erosiver und anderer Vorgänge regional oder örtlich verändert sein können. Die weitergehende Analyse der Datensätze (Phase 2) in Hinblick auf die Kriterienentwicklung erscheint damit sinnvoll. Beim Gesteinstyp Ton/Tonstein ist dabei die deutliche Abhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeit von der Tiefe des Messortes unter Geländeoberfläche zu berücksichtigen.

## 6. Weiteres Vorgehen

Aufbauend auf den Ergebnissen von Phase 1 sind in Phase 2 folgende weitere Arbeitsschritte durchzuführen:

- Vervollständigung der Datenbasis. Dabei sollte der Rechenschwerpunkt bei der Vervollständigung der Daten aus dem Erhebungsbereich Endlagerung radioaktiver Abfälle liegen. Dabei mit anfallende Daten aus anderen Erhebungsbereichen, insbesondere Wasserwirtschaft und Kohlenwasserstoff-Exploration, sollten miteingefasst werden. Auf die gezielte Recherche in diesen Bereichen kann aber nach den vorliegenden Erfahrungen verzichtet werden.
- Zuordnung der in den ausgewerteten Daten teilweise ausgewiesenen speziellen Gesteinstypen zu übergeordneten Typen, wie Gneis, Granit usw. und eventuell Bildung eigener Gesteinstyp-Gruppen für Wechsellagerungen oder andere Kombinationen verschiedener Gesteinstypen.
- Darstellung und Beurteilung der Faktoren, die neben dem Primärgefüge für lokale Besonderheiten und die Wertebandbreiten bei den einzelnen Gesteinstypen (Formationen) verantwortlich sind bzw. sein können. Dazu gehören beispielsweise Diagenese, Tektonik und Entlastung durch Erosion.
- Darstellung und Beurteilung etwaiger Zusammenhänge zwischen äußeren Lagermerkmalen von Gesteinskörpern, wie Tiefenlage oder regionaltektonische Position, und den hydraulischen Kenndaten.
- Vergleich von Durchlässigkeitsdaten aus verschiedenen Skalenbereichen (verschiedener räumlicher Repräsentativität).
- Untersuchung der Beziehung des  $k_f$ -Wertes zu Transmissivität und Testlänge.
- Vergleich von Speicherkoeffizienten und  $k_f$ -Werten gleicher Testbereiche.
- Zuordnung der vorliegenden hydraulischen Daten zu Gesteinstypen (wenn möglich bzw. erforderlich zu bestimmten Formationen), die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle grundsätzlich in Frage kommen (Festgesteine mit relativ geringer Wasserdurchlässigkeit).
- Identifizierung statistischer Kenndaten für die Charakterisierung der unterschiedenen Gesteinstypen und Prüfung der Signifikanz der Unterscheidung verschiedener Gesteinstypen anhand der zugeordneten hydraulischen Daten.
- Prüfung der Übertragbarkeit der vorliegenden Daten/Erfahrungen auf die Bedürfnisse der Kriterienentwicklung und -anwendung.
- Festlegung charakteristischer Bandbreiten der Wasserdurchlässigkeit für relevante Gesteinstypen.

Über diese Arbeiten hinausgehend wird vorgeschlagen, die vorhandenen Datensätze in einer Datenbank zusammenzufassen. Das erleichtert die Anwendung von Suchfunktionen und die Aufnahme neuer Datensätze.

## 7. Quellen

- ABELIN H., NERETNIEKS I., TUNBRANT S. & MORENO L. (1985): Final report of the migration in a single fracture- Experimental results and evaluation.- NAGRA - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 85-55; Wettingen (Schweiz).
- ADAMS J. & WYSS E. (1994): Hydraulic Packer Testing in the Wellenberg Boreholes SB1 and SB2 Methods and Field Results.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 93-38; Wettingen (Schweiz).
- ALMEN K.-E., CARLSSON L. & HANSSON K. (1981): Some experiences from well testing in pre-cambrian rocks of Sweden.- In 3rd Invitational Well-Testing Symposium „Well Testing in Low Permeability Environments“, National Technical Information Service, Proceedings, S. 15-25; Berkeley (Kalifornien, USA).
- AMMANN M., BIRKHÄUSER P., BLÄSI H. R., LAVANCHY J.-M., LÖW S., MEIER B. & MÜLLER W. H. (1993): Untere Süßwassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf – Charakterisierung mittels Geologie Petrophysik und Fluid Logging.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 92-03; Wettingen (Schweiz).
- ANTTILA P. (1986): Loviisa Power Station - final disposal of reactor waste – geological and hydrogeological conditions of the island of Hästholmen.- Imatran Voima Oy (IVO), Report YJZ-86-05, S. 66; Helsinki.
- APPEL, D. & KREUSCH, J. (2000): Günstige Konfiguration des Gesteinskörpers in der geologischen barriere - ein strukturorientierter Ansatz zur Auswahl von Endlagerstandorten.- Ausarbeitung für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte - AK End (30.9.2000).
- ARMITAGE P., HOLTON D., JEFFERIES N. L., MYATT B. J. & WILCOCK P. M. (1996): Groundwater flow through fractured rock at Sellafield.- European Commission, nuclear science and technology, Final report, S. 116; Luxembourg.
- BANKS D. C. (1972): In situ measurements of permeability in basalt.- Proceedings of the Symposium on Percolation Through Fissured Rock, S. T1-A; Stuttgart.
- BARBREAU A. & BOISSON J.-Y (1994): Caractérisation d'une formation argileuse – Synthèse des principaux résultats obtenus à partir du tunnel de Tournemire.- Commission européenne, sciences et techniques nucléaires, Rapport d'activité 1991-1993, EUR 15756 FR; Luxembourg.

- 
- BATSCHE H. & STEMPEL C. V. (1984): Hydrogeologisches Forschungsprogramm Asse – Zusammenfassender Zwischenbericht.- GSF (Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH), Bericht R 364/T 180, 130 S.; Neuherenberg, Braunschweig.
- BEAUFAYS R., BLOMMAERT W., BRONDERS J., De CANNIÉRE P., del MARMOL P., HENRION P., MONSECOUR M., PATYN J. & PUT M. (1994): Characterization of the Boom clay and its multilayered hydrogeological environment.- European Commission, Nuclear science and technology, Final report, Contract No FI1W/0055, 339 S.; Luxembourg (Belgien).
- BELANGER D. W., CAUFFMAN T. L., LOLCAMA J. L., LONGSINE D. E. & PICKENS J. F. (1989): Interpretation of hydraulic testing in the sediments of the Riniken borehole.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 87-17; Wetingen (Schweiz).
- BELANGER D. W., FREEZE G. A., LOLCAMA J. L. & PICKENS J. F. (1989): Interpretation of hydraulic testing in crystalline rock at the Leuggern borehole.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 87-19; Wetingen (Schweiz).
- BOISSON J.-Y, CABRERA J. & DE WINDT L. (1998): Étude des écoulements dans un massif argileux laboratoire souterrain de Tournemire.- Commission européenne, sciences et techniques nucléaires, Rapport final, EUR 18338 FR; Luxembourg.
- BJORLYKKE K. (1999): Principal aspects of compaction and fluid flow in mudstones.- In APLIN A. C., FLEET A. J. & MACQUAKER J. H. S. (eds) Mud and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties. Geol. Society, Sp. Publ. 158: 73-78; London.
- BOUWER H. & RICE R. C. (1976): A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells.- Water Resour. Res., 12: 423-428.
- BREDEHOEFT J. D. & PAPADOPOULOS I. S.(1980): A methode for determining the hydraulic properties in tight formations. – Water Resources Research, vol 16 Nr. 1: 223-238.
- BUTLER G. A., CAUFFMAN T. L., LOLCAMA J. L., LONSINE D. E. & McNEISH J. A. (1989): Interpretation of hydraulic testing at the Weiach borehole.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 87-20; Wetingen (Schweiz).

- 
- CARLSSON L., OLSSON T. (1985): Hydrogeological and Hydrogeochemical Investigations in Boreholes – Final report.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 85-57; Wettingen (Schweiz).
- COOPER H. H. Jr. & JACOB C. E. (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field theory.- Trans. AGU, 27(4): 526-534.
- COOPER H. H. JR, BREDEHOEFT J. D. & PAPADOPULOS I. S. (1967): Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water.- Water Resour. Res., 3(1): 263-269.
- DAVID I. (1997): Grundwasserhydraulik – Strömungs- und Transportvorgänge.- 204 S., 84 Abb.; Braunschweig, Wiesbaden (Vieweg).
- DE CANNIÈRE, P., PUT M. J. & NEERDAEL B. (1994): Hydraulic Characterization of the Boom Clay Formation from the HADES Underground Laboratory in Mol: Evolution and Assessment of the Piezometric Techniques.- In Proceedings of an International Workshop: Hydraulic and Hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks, OECD Documents, S. 159-166; Nottingham (UK).
- DE MARSILY G. (1986): Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers.- Academic Press, Inc; London.
- DROST, W. (1984): Einbohrlochmethoden zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit und der Fließrichtung des Grundwassers.- Wasser und Boden, 4: 149-153.
- DROST, W. (1986): Groundwater measurements by means of radioactive tracers.- Atomkernenergie.Kerntechnik, Vol. 48, Nr. 2: 81-86.
- DROST, W., FLECK, R., HOFREITER, G., KLOSTERMEIER, W. (1989): Einbohrlochtechnik im Kluftgrundwasserleiter.- Institut für Hydrologie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Jahresbericht 1989: 239-241; Neuherenberg.
- DUPOUIT J. (1863): Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables.- 2. Aufl. XXVII, 304 S.; Paris (Dunod).
- EARLOUGH R. C. (1977): Pressure Buildup Testing. Advances in Well Test Analysis.- Monograph Series, Vol. 5, Society of Petroleum Engineer of AIME; New York.

- 
- EMPFEHLUNG NR. 9 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (1984): Wasserdruckversuch im Fels.- Bautechnik, 4: 112-117.
- ENACHESCU C., LAVANCHY J.-M., OSTROWSKI L. & WOZNIEWICZ J. (1997): Hydrological investigations at Wellenberg: Hydraulic packer testing in boreholes SB4a/v and SB4a/s – Methods and field results.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 95-02; Wetingen (Schweiz).
- FAUST Ch. R. & MERCER J. W. (1984): Evaluating of slug tests in wells containing a finite-thickness skin.- Water Resour. Res., 20, 4: 504-506.
- FULDA, C., KESSELS, W., WONIK, T. & ZOTH, G. (1999): Geoelectric Determination of Natural Groundwater Flow - AGU Fall Meeting, San Francisco, supplement to EOS, Transactions AGU 80(46): p. 290.
- GeoUM (1998): Studie zur Beurteilung der Langzeitsicherheit der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen.- Büro Geowissenschaften & Umwelt GbR (unveröffentlicht).
- GETA LÓPEZ J. A., OLMEDO GRIMA J. & NAVARRETE MARTINEZ C. (1994): Borehole Testing and Test Interpretation in the San Pedro Clay Formation.- In Proceedings of an International Workshop: Hydraulic and Hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks, OECD Documents, S. 195-256; Nottingham (UK).
- GRINGARTEN A. C. & RAMEY H. J. (1974): Usteady-State Pressure Distributions Created by a Well with a Single Horizontal Fracture, Partial Penetration, or Restricted Entry.- Soc. Petrol. Engineers of AIME, SPE 4051: 24 S.; Dallas (Texas, USA).
- GRISAK G. E., PICKENS J. F., BELANGER D. W. & AVIS J. D. (1985): Hydrogeologic Testing of Crystalline Rocks during the Nagra Deep Drilling Program.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 85-08; Wetingen (Schweiz).
- GRONEMEIER K. (1990): Hydrogeologische Erkundung zur Sicherung der SAD Münchheagen.- Ergebnisbericht, Dr. Pieles + Dr. Gronemeier Consulting GmbH, unveröffentl., 420 S.
- GROUND WATER at YUCCA MOUNTAIN – How High Can It Rise (1992): Final Report of the Panel on Coupled Hydrologic/Tectonic/Hydrothermal Systems at Yucca Mountain.- National Academy Press; Washington D. C..

- 
- GUYONNET D., KELLEY V., LAVANCHY J.-M., LÖW S. & MISHRA S. (1992): Interpretation of crosshole hydraulic tests and a pilot fluid logging test for selected boreholes within the BK-Site.- VOMVORIS S., FRIEG B. (eds), NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 91-01; Wettingen (Schweiz).
- GUYONNET D., RIVERA A., LÖW S., CORREA N. (1993): Analysis and Synthesis of Fluid Logging Data from Wellenberg Boreholes SB1, SB2, SB3, SB4 und SB5.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 92-01; Wettingen (Schweiz).
- HEKEL U. (1992): Forschungsprojekt „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“ (FGmT).- Textband, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 190 S..
- HESS, A. E. (1984): Use of Low-Velocity Borehole Flowmeter in the study of hydraulic conductivity in fractured rock.- in NWWA/EPA Conference on Surface and Borehole Geophysical Methods in Ground Water Investigations, Nielsen, M., Curl, M. (Ed.), National Water Well Association, S. 812-832; San Antonio, Texas.
- HEITFELD K. H. (1965): Hydro- und baugelogische Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Untergrundes an Talsperren des Sauerlandes.- Geol. Mitt. 5: 1-210; Aachen.
- HOEHN E., FIERZ TH. & THORNE P. (1990): Grimsel Test Site – Hydrogeological characterisation of the migration experimental area at the Grimsel Test Site.- NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technical Report 89-15; Wettingen (Schweiz).
- HORNER D. R. (1951): Pressure build-up in wells.- Proc. Third World Petroleum Congress, The Hague, Section II, S. 503-523.
- HUBBERT M. K. (1940): The theory of groundwater motion.- The Journal of Geology, No. 8, Part 1, Vol. XLVIII.
- HUFSCHMIED P. (1983): Die Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockergesteins-Grundwasserleitern, eine vergleichende Untersuchung verschiedener Feldmethoden.- Diss. ETH-Zürich Nr. 7397.
- HVORSLEV M. J. (1951): Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations.- U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Bulletin 36; Vicksburg, Miss.

---

JACOB C. E. (1940): On the flow of water in an elastic artesian aquifer.- Trans. American. Geophys. Union, 21: 574-586; Washington D.C.

JACOB C. E. & LOHMAN S. W. (1952): Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer.- American Geophysical Union Transaction, Vol. 33, Nr. 4, S. 559-569.

JNC (2000): H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan.- JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute), Supporting Report 1, Geological Environment in Japan.

JOBMANN M. (1990): Thermischer Injektionstest.- In KTB Report 90-5, Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 9): Hydraulische Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB, Projektleitung im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung: KESSELS W., S. 319-329; Hannover.

KÄSS W. (1992): Geohydraulische Markierungstechnik.- Lehrbuch der Hydrogeologie, MATTHESS G. (Hrsg.), Band 9, 519 S.; Berlin, Stuttgart (Gebüder Borntraeger).

KESSELS W. (1990): Hydraulische Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB.- KTB Report 90-5, NLFb, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 547 S.; Hannover.

KESSELS, W. & ZOTH, G. (1999): Doppelmantelpacker mit geoelektrischer Meßtechnik zur Bestimmung der Grundwasserströmung und hydraulischer Eigenschaften von Grundwasserleitern. -59. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft; 8.-12.März 1999; Braunschweig.

KRAUS (1974): Die Bestimmung der Transmissivität von Grundwasserleitern aus dem Einschwingverhalten des Brunnen-Grundwasserleiter-Systems.- J. Geophys., 40: 381-400; Berlin.

KULL H., BREWITZ W., KLARR K. (1993): Ventilationstest – In-Situ-Verfahren zur Permeabilitätsbestimmung im Kristallin.- NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, 91-02, 116 S.; Baden (Schweiz).

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1991): Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit.- Materialien zur Altlastenbearbeitung, Bd. 8, 104 S.; Karlsruhe.

- 
- LIEDTKE L., SHAO H., ALHEID H. J. & SÖNNKE J. (1999): Stofftransport in geklüftetem Fels – Gebirgscharakterisierung im Stollennahbereich.- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Felslabor Grimsel Phase IV, Berichtszeitraum 1.7.1994-30.9.1998, unveröffentlicht; Hannover.
- LEECH R. E. J., KENNEDY K. G. & GEVAERT D. (1984): Sondierbohrung Böttstein – Hydrogeologic testing of crystalline rocks.- NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, 85-09, 156 S.; Baden (Schweiz).
- LOHMANN S. W. (1972): Groundwater Hydraulics.- U.S. Geol. Survey Prof. Paper 708, U.S. Government Print Office, Washington.
- LONG J. C. S., WITHERSPOON P. A., WILSON C. R. & DuBOIS A. O. (1981): Large-Scale Permeability Testing at Stripa.- In 3rd Invitational Well-Testing Symposium „Well Testing in Low Permeability Environments“, National Technical Information Service, Proceedings, S. 38-44; Berkeley (Kalifornien, USA).
- LOUIS C. (1967): Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels.- Veröffentl. Des Inst. F. Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 121 S.; Karlsruhe.
- McCORD J. P. & MOE H. (1990): Interpretation of hydraulic testing at the Kaisten borehole.- NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, 89-18, 239 S.; Baden (Schweiz).
- MAIER J., DÖRHÖFER G. (1995): Feld- und Laboruntersuchungen zum Stofftransport in grundwasserführenden, geklüfteten Tongesteinen.- Forschungsvorhaben „Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten“, Abschlussbericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, S. 65; Hannover.
- MARSCHALL P. & BARCZEWSKI B. (1990): Evaluation of single borehole hydrotests in frequency domain by a univariate statistical method.- In: calibration and reliability in groundwater modelling, Kovar K. (Hrsg.), IAHS Publications Nr. 195; Wallingford.
- MARSCHALL, P. (1993): Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren.- Institut für Wasserbau Universität Stuttgart, Mitteilungen, H. 79, S. 161; Stuttgart.

---

MATEEN K. (1983): Slug-Test data analysis in resevoirs with double porosity behavior.- Stanford Geothermal Program, Stanford University, SGP-TR-70.

MATEEN K. & RAMEY H. J. (1984): Slug test data analysis in reservoirs with double porosity behavior.- Paper SPE 12779: 459-468.

MOE H., McNEISH J. A., McCORD J. P. & ANDRERWS R. W. (1990): Interpretation of hydraulic testing at the Schafisheim borehole.- NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, 89.09, 85 S.; Baden (Schweiz).

MOYE D. G. (1967): Diamond Drilling for Foundation Exploration.- Civil Eng. Trans., Inst. Eng. Australia, Apr. 1967, S. 95-100.

MÜLLER C. (1984): Transmissivitätsmessungen mit dem Einschwingverfahren – vergleichende Untersuchungen mit vollkommenen und unvollkommenen Brunnen.- Berichte des Geol.-Paläontologischen Inst. D. Universität Kiel, Nr. 3, 105 S.; Kiel.

NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (1988): Fluid-Logging: Temoeratur-, Leitfähigkeits- und Spinner-Flowmeter-Messungen: Sondierbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Schfisheim, Kaisten, Leuggern.- Technischer Bericht, 85-10; Baden (Schweiz).

NAUJOKS A. (1994): Theoretische Grundlagen und In-situ-Untersuchungen zur Durchstömung von geklüftetem Kristallingestein.- Forschungsbericht (unveröffentl.)

NEUZIL C. E. (1994): Characterization of Flow Properties, Driving Forces, and Pore-Water Chemistry in the Ultra-Low-Permeability Pierre Shale, North America.- In Proceedings of an International Workshop: Hydraulic and Hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks, OECD Documents, S. 65-74; Nottingham (UK).

NGUYEN V. & PINDER G. F. (1984): Direct calculation of aquifer parameters in slug test analysis. – In: ROSENHEIM J. & BENNET G. D. (Eds.): Groundwater hydraulics, Water Resources Monograph, 9: 222-239, Americ. Geophys. Union.

NOVAKOWSKI K. S. (1989): Analysis of pulse interference tests.- Water Resour. Res., 25(11): 2377-2387.

- 
- NOVAKOWSKI L. P. (1990): Analysis of Aquifer Tests Conducted in Fractured Rock: A Review of the Physical Background and the Design of a Computer Program for Generating Type Curves.- *Ground Water*, Vol. 28 Nr. 1, S. 99-107.
- OSTROWSKI L. P. & KLOSKA M. B. (1989): Final interpretation of hydraulic testing at the Siblingen borehole.- NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, 89.10, 95 S.; Baden (Schweiz).
- PAPADOPULOS I. S., BREDEHOEFT J. D. & COOPER H. H. Jr. (1973): On the analysis of slug test data.- *Water Res.*, 9(4): 1087-1089.
- PEARSON F. J. (1999): What is the porosity of a mudrock?- In: APLIN A. C., FLEET A. J. & MACQUAKER J. H. S. (Eds.), *Muds and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties*. Geological Society, London, Special Publ. 158: 9-21.
- PERES A. M. M., ONUR M. & REYNOLDS A. C. (1989): A new analysis procedure for determining aquifer properties from slug test data.- *Water Resour. Res.* 25(7): 1591-1602.
- POTRERI A. & LAITINEN M. (1999): Site to canister scale flow and transport in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara.- *Posiva Report 99-15*, 156 S.; Helsinki.
- RAMEY H. J. JR., AGARWAL R. G. & MARTIN I. (1975): Analysis of slug test or dst flow period data.- *J. Canad. Petrol. Technol.*, 14(3): 37-47.
- REPSOLD H. (1989): Well logging in groundwater development.- UNESCO; -DVGW, *International Contributions to Hydrogeology*; Bd. 9, 145 S., 33 Abb., 12 Anl.; Hannover.
- RISSLER P. (1977): Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von klüftigem Fels.- *Veröff. Inst. Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau*, Bd. 5, 144 S.; Aachen.
- ROSENFELD, M. (1998): Fluid-Logging.- In *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten / BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*, Bd. 4 Schreiner, M.: *Geotechnik Hydrogeologie*, S. 282-298; Springer.
- SCHÖNFELD E. (1985): Die Grundwasserbewegung im Deckgebirge und am Salzspiegel des Salzstockes Asse.- *Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München*, 107 S.; München.

---

SCHULZE-MAKUCH D. & MALIK P. (2000): The sacling hydraulic properties in granitic rocks.- in Hydrogeology of Crystalline Rocks, STOBER I. & BUCHER K. (Hrsg.), S. 127-138; Kluwer (Netherlands).

STEVENSON D. R., KOZAK E. T., DAVIDSON C. C., GASCOYNE M. & BROADFOOT R. A. (1996): Hydrogeologic Characteristics of Domains of Sparsely Fractured Rock in the Granite Lac du Bonnet Batholith, Southeastern Manitoba, Canada.- AECL, Atomic Energy of Canada Limited, CC2-11558E, 26 S.; Pinawa (Manitoba, Canada).

STRELTSOVA T. D. (1983): Well pressure behaviour of a naturally fractured aquifer.- Soc. Eng. J., Oct. 1983, S. 769-780.

STOBER I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- Geol. Jb., C42: 3-204, 57 Abb., 8 Tab.; Hannover.

STOBER, I. (1993): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Habilitationsschrift, Geowissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., 227 S.; Freiburg i. Br..

STOBER, I (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- 191 S, Enke; Stuttgart.

SUTTON S., SOLEY R., JEFFERY R., CHACKRABARTY C. & McLEOD R. (1996): Cross hole hydraulic testing between deep boreholes 2 and 4 at Sellafield.- European Commission, nuclear science and technology, Topical report, S. 186; Luxembourg.

THEIS C. V. (1935): Relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage.- Am. Geophy. Union Trans., Vol. 16.

THIEM, A. (1870): Die Ergiebigkeit artesischer Bohrlöcher, Schachtbrunnen und Filtergalerien.- Jour. für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 14; S. 450-467; München.

THIEM G. (1906): Hydrogeologische Methoden.- Leipzig (Gebhard).

THOMPSON B. M. (1990): KPFLOW – A Program to Analyse Borehole Flowmeter Data. Unpubl. Nagra Interner Ber.

TSANG, C.F. & HUFSCHMIED, P. (1988): A borehole fluid conductivity logging method für the determination of fracture inflow parameters.- Nagra Technischer Bericht 88-13, 37 S.; Baden (Schweiz).

VOEGELE M., Mc CAIN R., GRONSETH M. & PRATT H. (1981): In situ permeability measurements for an underground compressed air storage project.- In 3rd Invitational Well-Testing Symposium „Well Testing in Low Permeability Environments“, National Technical Information Service, Proceedings, S. 45-49; Berkeley (Kalifornien, USA).

WEBER J. R. & NOWAK T. (2000): Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben 2. Zwischenbericht/Jahresbericht 1998: Ergebnisse aus Bohrlochtests zu Permeabilitätsbestimmung.- BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, unveröffentlicht; Hannover.

WYSS E. (1989): Felslabor Grimsel – Hydrogeologische Untersuchungen zur Bestimmung hydraulischer Potentiale.- NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, 89-01, 24 S.; Baden (Schweiz).

ZOTH, G. & FESCHE, H.-W. (1985): Entwicklung und Bau einer Temperatur-Tiefbohrlochsonde.- Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 85-091; Eggenstein – Leopoldshafen (Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik).

ZÖTL J. G. (1974): Karsthydrogeologie.- 291 S., 114 Abb., 2 Taf.; Wien, New York (Springer).