

Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie)

– geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren –

Vorwort

Der Bund-Länder-Ausschuss „Bodenforschung“ (BLA-GEO) hat am 23./24.09.2004 der Ad Hoc AG „Geologie“ der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) den Auftrag erteilt, zwei Personenkreise (PK) zu den Themen „Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials“ und „Nutzung des tiefen geothermischen Potenzials“ einzurichten. Die beiden PK sollen einen bundeseinheitlichen digitalen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung geothermischer Daten erarbeiten.

Der PK „Tiefe Geothermie“ hat in seiner Sitzung am 15.06.05 beschlossen, die für die jeweiligen Nutzungen zu erfassenden wichtigen Daten bzw. Parameter zu definieren. Außerdem sollen die hierfür relevanten Untersuchungsmethoden und -verfahren skizziert werden. Das hier vorgelegte Papier stellt eine Grundlage und Hilfestellung für die bei tiefengeothermischen Nutzungen relevanten und daher zu erhebenden Parameter dar. Es ist ferner Grundlage für den Produktkatalog zur geothermischen Nutzung des tiefen Untergrundes durch hydrothermale Dubletten, der im Zuge des Projektes GeotIS (Geothermisches Informationssystem Deutschland) aufgebaut wird.

*Die **tiefe Geothermie** umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveauanhebung) genutzt werden kann.*

Für die Nutzung eines jeden geothermischen Systems ist die Kenntnis der hydraulischen, chemischen und geothermischen Verhältnisse des Untergrundes unerlässlich. Die für die unterschiedlichen Systeme darüber hinaus benötigten spezifischen Untergrunddaten werden am Ende des Papiers aufgeführt. Zusammen mit der Arbeitshilfe des PK Tiefe Geothermie (www.infogeo.de/infogeo/dokumente) ist es eine Handreichung für die Entwicklung eines Produktkatalogs bei der Nutzung des tiefen geothermischen Untergrundes durch eine spezielle Anlage.

Das jetzt vorliegende „Parameterpapier“ wurde vom PK Tiefe Geothermie der Ad Hoc AG „Geologie“ des Bund-Länder-Ausschusses „Bodenforschung“ (BLA-GEO) erstellt. Mitglieder im PK Tiefe Geothermie waren: H. Feldrappe, H.-G. Fritsche, T. Fritzer, M. Göthel, H. Huckriede, M. Kracht, K. Obst, M. Pasternak, S. Pester, I. Rappsilber, R. Schellschmidt, R. Schulz, I. Stober, R. Storz, C. Thomsen, T. Walter, W. Wirth, P. Wolf und V. Wrede. Der Personenkreis wurde von Frau I. Stober geleitet. Der PK möchte den Geologischen Diensten hiermit eine Handreichung für die Beurteilung von Anträgen oder Gutachten geothermischer Nutzungen aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) geben.

Inhaltsverzeichnis

1	Untergrundtemperatur	4
1.1	Physikalische Grundlage	4
1.2	Temperatur, Temperaturgradient	4
1.3	Wärmestromdichte	5
2	Thermophysikalische Gesteinseigenschaften.....	6
2.1	Wärmeleitfähigkeit.....	6
2.2	Gesteinsdichte	6
2.3	Wärmekapazität	6
3	Hydraulische Parameter	7
3.1	Physikalische Grundlagen	7
3.2	Druck.....	7
3.3	Permeabilität, Durchlässigkeit	8
3.4	Transmissivität, Transmissibilität.....	9
3.5	Porosität	9
3.6	Speicherkoeffizient.....	10
3.7	Produktivitätsindex, Injektivitätsindex.....	10
3.8	Weitere Parameter	11
4	Hydraulische Tests	12
4.1	Einbohrlochverfahren	12
4.2	Testprinzip.....	13
4.3	Mess- und Registriergeräte	14
4.4	Testverfahren	14
4.5	Auswertung von Pumpversuchen.....	21
5	Laboruntersuchungen.....	23
5.1	Permeabilität	23
5.2	Porosität	23
5.3	Wärmeleitfähigkeit.....	24
5.4	Gesteinsdichte	25
6	Bohrlochvermessungen.....	25
7	Geometrische Eigenschaften.....	26
8	Physikalisch-chemische Fluideigenschaften	26
9	Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie: Aquifere	30
10	Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie: Störungen	30

11	Petrothermale Systeme: Grundgebirge (HDR-Technik)	31
12	Petrothermale Systeme: Beliebige Gestein (Tiefe Erdwärmesonde)	33
13	Überblick über die für die verschiedenen geothermischen Nutzungssysteme relevanten Parameter	35
14	Literaturliste, Regelwerke, Quellen, Links	36
14.1	Verwendete Literatur	36
14.2	Allgemeine weiterführende Literatur	37
14.3	Verwendete Regelwerke	37
14.4	Quellenhinweise für Abbildungen	38

1 Untergrundtemperatur

1.1 Physikalische Grundlage

Die konduktive Wärmeleitung wird durch die *Fourier-Gleichung* beschrieben:

$$q = \lambda \cdot \nabla T \quad (1a)$$

mit der Wärmestromdichte q in $W\ m^{-2}$ (vgl. Abschn. 1.3), der Wärmeleitfähigkeit λ in $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ (vgl. Abschn. 2.1) und dem Temperaturgradienten ∇T in $K\ m^{-1}$ (vgl. Abschn. 1.2). Da der Wärmestrom in der Erdkruste in der Regel vertikal nach oben orientiert ist, kann die Fourier-Gleichung in der 1D-Formulierung angesetzt werden:

$$q = \lambda \cdot \frac{dT}{dz} \quad (1b)$$

Unter der Annahme, dass zwischen den Messpunkten Erdoberfläche und Tiefe z keine Wärmequellen vorhanden sind, kann Gleichung (1b) umformuliert werden:

$$T(z) = T_0 + q \cdot \frac{z}{\lambda} \quad (1c)$$

wobei T_0 die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche ist. Bei vorhandenen Wärmequellen gilt:

$$T(z) = T_0 + q \cdot \frac{z}{\lambda} - \frac{1}{2} \cdot H \cdot \frac{z^2}{\lambda} \quad (1d)$$

mit der spezifischen volumetrischen Wärmeproduktion H in $W\ m^{-3}$.

1.2 Temperatur, Temperaturgradient

(temperature, temperature gradient)

Parameter: Temperatur T

– Maßeinheit: $^{\circ}C$

Bestimmung: In-situ Messungen in Bohrungen

Methoden: Korrekturverfahren zur Ermittlung von ungestörten Gesteinstemperaturen (z.B. aus BHT-Werten [BHT - Bottom-Hole-Temperature])

Sekundäre Parameter für Korrekturverfahren:

- Bohrlochdurchmesser [m]
- Stillstandszeit [h]
- Temperaturleitfähigkeit α des Gesteins [$m^2\ s^{-1}$], ein Parameter, der mit der Wärmeleitfähigkeit λ [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$] verwandt ist: $\alpha = \lambda / (\rho\ c_p)$ (Abschn. 2.1, 2.3).

Der Temperaturgradient ∇T oder $gradT$ [$K\ m^{-1}$] ist die Temperaturzunahme pro Tiefenabschnitt. In Deutschland beträgt er im Mittel 28–30 $K\ km^{-1}$.

Innerhalb des FIS „Geophysik“ des GGA-Institutes steht eine Datenbank mit der Möglichkeit der Berechnung von Untergrundtemperaturen zur Verfügung, die Temperatur-Informationen aus rund 10.000 Bohrungen im Untergrund Deutschlands enthält. Es handelt sich dabei um:

- *Ungestörte Temperaturlogs*: kontinuierliche Messungen der Temperatur mit der Tiefe.

- *Gestörte Temperaturlogs*: kontinuierliche Messungen der Temperatur mit der Tiefe, die durch Bohrvorgang, Zementation oder hydraulische Zirkulation gestört sind.
- *Lagerstättentemperaturen*: Sie liegen aufgrund regelmäßiger, langjähriger Kontrolle von Förderbohrungen als umfangreiche Messwertreihen von bis zu 100 Einzelwerten vor; die Schwankungsbreite dieser Temperaturwerte liegt überwiegend unter 1°C, so dass sie i. d. R. zu einem Temperatur-Messwert zusammengefasst werden können.
- *Testtemperaturen*: Temperaturmessungen bei Fördertests, Drill Stem Tests o. ä.; korrigierte Auslauftemperaturen.
- *Bottom Hole Temperatures (BHT)*: BHT-Messungen werden in fast allen Industriebohrungen im Bohrlochtiefsten, unmittelbar nach Einstellen der Bohrarbeiten, ausgeführt und sind durch den Bohrvorgang (Spülungsumlauf) thermisch gestört. Eine Korrektur (Extrapolation) dieser BHT-Werte auf ungestörte Temperaturen ist möglich, da im Bohrlochtiefsten der störende Einfluss des Spülungsumlaufs auf das Temperaturfeld am geringsten ist. In Abhängigkeit von der Stillstandszeit nach Bohrende, der Spüldauer (Spülungsumlauf) und der Anzahl der für jede Tiefe zur Verfügung stehenden Temperaturwerte werden unterschiedliche Korrekturverfahren angewendet.
- Einzelpunktmessungen aus *Bergwerken und Tunneln*.

Weiterverarbeitung / Anonymisierung:

Die Interpolation von Daten für Temperaturkarten erfolgt in zwei Schritten. Die Daten werden für eine vorgegebene Tiefe interpoliert und anschließend für diesen Tiefenhorizont lateral in die Fläche. Zu einem gewissen Maße ist auch die Extrapolation der Temperatur in Tiefen möglich, in denen keine Messungen stattgefunden haben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Grundwasserströmungen den Temperaturgradienten über große Teufenintervalle verändern können. Modellrechnungen können helfen, solche Systeme zu erfassen, zu quantifizieren und schließlich Aussagen in größeren Tiefen mit fehlenden Daten zu treffen.

Wertebereich: Mittlere Temperatur an der Erdoberfläche in Deutschland: niedrigster Wert: -4,8 °C (Zugspitze); Mittelwert: 8,2 °C; höchster Messwert in Bohrungen: 253 °C in 9063 m Tiefe (KTB Oberpfalz)

1.3 Wärmestromdichte

(heat flow density)

Parameter: *Wärmestromdichte* q

- Maßeinheit: W m^{-2}

Definition: Die Wärmestromdichte ist der Wärmestrom aus der Erde pro Einheitsfläche.

Bestimmung: Grundlage ist die Fourier-Gleichung (vgl. Abschn. 1.1).

In-situ Messung der Temperatur in Bohrungen, daraus abgeleitet der Temperaturgradient; Messung der Wärmeleitfähigkeit an Bohrkernen im Labor (ersatzweise Literaturwerte für gleiche Lithologie, vgl. Abschn. 2.1).

Methoden: Temperaturextrapolation in die Tiefe z (vgl. Abschn. 1.1). Die Extrapolation setzt reine konduktive Wärmeübertragung voraus (vgl. Abschn. 1.1).

Sekundäre Parameter zur Berechnung:

- Mittlere Temperatur an der Erdoberfläche T_0
- Wärmeleitfähigkeit λ

Wertebereich: 30–120 mW m⁻². Die mittlere Wärmestromdichte beträgt in Deutschland etwa 65 mW m⁻².

2 Thermophysikalische Gesteinseigenschaften

2.1 Wärmeleitfähigkeit

(thermal conductivity)

Parameter: *Wärmeleitfähigkeit* λ

– Maßeinheit: W m⁻¹ K⁻¹

Definition: Die Wärmeleitfähigkeit ist der Quotient aus Wärmestromdichte und dem Temperaturgradienten (vgl. Abschn. 1.2).

Bestimmung: Messung am Bohrkern im Labor;

Die Wärmeleitfähigkeit ist temperaturabhängig. Meist werden die Werte für Zimmertemperatur angegeben. Durch Kenntnis der Reservoirtemperatur lassen sich anhand von Literaturangaben Abschätzungen für tiefe Aquifere treffen. Für die Größe der Wärmeleitfähigkeit ist entscheidend, ob die Messungen an trockenen oder feuchten Bohrkernen durchgeführt wurden.

Wertebereich: 1,2–6,5 W m⁻¹ K⁻¹

2.2 Gesteinsdichte

(rock density)

Parameter: *Dichte* ρ

– Maßeinheit: kg m⁻³

Definition: Masse pro Volumen

Bestimmung: Messung am Bohrkern im Labor; bohrlochgeophysikalische Messungen.

Wertebereich: 2000–3200 kg m⁻³; vereinzelt (z.B. bei Eklogiten) können auch höhere Werte angetroffen werden.

2.3 Wärmekapazität

(heat capacity)

Parameter: *spezifische Wärmekapazität* c , *isobare spezifische Wärmekapazität* c_p

– Maßeinheit: J kg⁻¹ K⁻¹

Definition: Die spezifische Wärmekapazität ist das Verhältnis der einem Körper zugeführten Wärme zur entsprechenden Temperaturänderung und seinem Gewicht. Sie beschreibt das Vermögen eines Stoffes, Wärme zu speichern und ist temperaturabhängig. Die isobare spezifische Wärmekapazität ist die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck.

Bestimmung: Messung am Bohrkern im Labor.

Wertebereich: 700–1100 J kg⁻¹ K⁻¹ (Mittelwert: 840 J kg⁻¹ K⁻¹ – mit geringer Schwankungsbreite)

Parameter: *volumenbezogene spezifische Wärmekapazität* $c \cdot \rho$

– Maßeinheit: J m⁻³ K⁻¹

Definition: Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte.

Bestimmung: Messung am Bohrkern im Labor.

Wertebereich: $1,9\text{--}2,5 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ (Mittelwert: $2,1 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ – mit geringer Schwankungsbreite)

Der Parameter ist wichtig bei der Beschreibung transienter, d. h. zeitlich veränderlicher, Prozesse.

3 Hydraulische Parameter

3.1 Physikalische Grundlagen

Der Massenfluss in einem porösen Medium wird durch das *Darcy-Gesetz* beschrieben:

$$q = k_f \cdot \nabla h \quad (2a)$$

mit der volumetrischen Fließrate pro Einheitsfläche q in m s^{-1} , der hydraulischen Durchlässigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert) k_f in m s^{-1} (vgl. Abschn. 3.3) und dem hydraulischen Potentialgradienten ∇h . In der 1D-Formulierung gilt:

$$q = k_f \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = k_f \cdot i \quad (2b)$$

∂h ist der Potentialunterschied über die Wegstrecke ∂x in Fließrichtung und $\partial h / \partial x$ wird als hydraulischer Gradient i bezeichnet. Kennt man den durch den Grundwasserfluss erfassten Querschnitt A , so lässt sich mit

$$Q = k_f \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = k_f \cdot A \cdot i \quad (2c)$$

der Durchfluss pro Zeiteinheit Q in $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ bestimmen. Das Darcy-Gesetz wird auf alle Fließvorgänge in Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleitern angewendet und zur Auswertung hydraulischer Tests in einem oder mehreren Bohrlöchern herangezogen. Es ist aber streng genommen nur gültig im Bereich laminaren (linearen) Fließens.

3.2 Druck

(pressure)

Parameter: *Druck* p

– Maßeinheit: Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa}$)

Definition: Der Druck ist das Verhältnis der Kraft (F) zur Wirkungsfläche (A), auf die die Kraft senkrecht wirkt.

$$p = \frac{F}{A} \quad (3a)$$

Parameter: (*absoluter*) *hydrostatischer Druck* [hydrostatic pressure]

– Maßeinheit: bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa}$); $1 \text{ m Wassersäule (m WS)} = 0,9807 \text{ kPa} \approx 0,1 \text{ bar}$

Definition: Der hydrostatische Druck ist der Druck, der sich innerhalb einer ruhenden Flüssigkeit (i.d.R. Wasser) unter dem Einfluss der Erdbeschleunigung (g) einstellt. Es ist eine statische Größe, die von der Höhe (h) des Flüssigkeitsspiegels und der Dichte (ρ_f) über dem Messpunkt abhängt (vgl. Abschn. 8).

$$p_g = h \cdot \rho_F \cdot g \quad (3b)$$

Der absolute hydrostatische Druck (oder der „Druck“) an einem Punkt innerhalb eines Grundwasserkörpers ergibt sich als Summe aus atmosphärischem Druck (p_{atm}) und dem jeweiligen hydrostatischen Druck (p_g):

$$p = p_{atm} + p_g \quad (3c)$$

Bestimmung: Messung im Bohrloch mittels Drucksonde.

3.3 Permeabilität, Durchlässigkeit

(permeability, hydraulic conductivity)

Parameter: Permeabilität K

- Maßeinheit: m^2 (1 Darcy = $0,98697 \cdot 10^{-12} m^2$)

Parameter: Durchlässigkeit oder Durchlässigkeitsbeiwert k_f

- Maßeinheit: $m s^{-1}$

Definition: Die Permeabilität und der Durchlässigkeitsbeiwert beschreiben die Durchlässigkeit eines porösen Mediums gegenüber einem Fluid (z. B. Wasser), wobei sich die Permeabilität allein auf die Gesteinseigenschaften beschränkt und der Durchlässigkeitsbeiwert die Eigenschaften des Fluids zusätzlich einbezieht. Der Durchlässigkeitsbeiwert gibt an, welcher Volumenstrom Q bei einem hydraulischen Gradienten i pro Fläche A bei einer bestimmten Fluidtemperatur strömt. Die Permeabilität steht mit dem Durchlässigkeitsbeiwert unter Berücksichtigung der dynamischen Viskosität μ und der Dichte ρ_F des Fluids und der Erdbeschleunigung g durch die Formel

$$k_f = \frac{K \cdot \rho_F \cdot g}{\mu} \quad (4)$$

in Beziehung. Für reines Wasser bei 10 °C gilt folgendes Äquivalent: $10^{-5} m s^{-1}$ entspricht 1 D oder $1 m s^{-1}$ entspricht etwa $10^{-7} m^2$. Beide Parameter K und k_f können richtungsabhängig sein und müssen dann als Tensor geschrieben werden.

Bestimmung: Messungen an Bohrkernen im Labor (Eigenschaft der Gesteinsmatrix), Ableitung aus Bohrlochmessungen (Permeabilität); Auswertung von Pump- und Injektionstests, Markierungsversuchen (Eigenschaft des Gebirges).

Sekundäre Parameter (vgl. Abschn. 8):

- dynamische Viskosität des Fluids μ [$kg m^{-1} s^{-1}$]
- kinematische Viskosität des Fluids $\nu = \frac{\mu}{\rho_F}$ [$m^2 s^{-1}$]
- Dichte des Fluids ρ_F [$kg m^{-3}$]

Dichte und Viskosität des Wassers beeinflussen maßgeblich die Durchlässigkeit. Die Größen sind von der Art und Größe des Lösungsinhalts, dem Druck, dem Gasgehalt und der Temperatur abhängig.

Wertebereich: 10^{-8} – 10^{-20} m² (permeabel > 10^{-13} m², die Mindestpermeabilität für eine hydrothermale Nutzung sollte über $0,25 \cdot 10^{-12}$ m² liegen).
Oder entsprechend: 10^{-1} – 10^{-13} m s⁻¹ (durchlässig > 10^{-6} m s⁻¹).

3.4 Transmissivität, Transmissibilität

(transmissivity, transmissibility)

Parameter: *Transmissivität T*

– Maßeinheit: m² s⁻¹

Definition: Die Transmissivität beschreibt den integralen Wert der Durchlässigkeit über die Aquifermächtigkeit:

$$T = \int_0^H k_f dz \quad (5a)$$

Ist der Aquifer homogen und isotrop, so gilt

$$T = k_f \cdot H \quad (5b)$$

Bei einem Schicht- (Stockwerks-)aufbau des Aquifers gilt entsprechend

$$T = \sum k_{f,i} \cdot H_i \quad (5c)$$

Integriert man anstatt über den Durchlässigkeitsbeiwert über die Permeabilität K , so spricht man von *Transmissibilität* [m³].

Bestimmung: Auswertung von Pump- und Injektionstests (vgl. Abschn. 4.5).

Wertebereich: 10^{-7} – 10^{-18} m³ (die Mindesttransmissibilität für eine hydrothermale Nutzung sollte über $5 \cdot 10^{-12}$ m³ liegen). Entsprechend 10^0 – 10^{-11} m² s⁻¹ (Mindestwert: $5 \cdot 10^{-5}$ m² s⁻¹).

3.5 Porosität

(porosity)

Parameter: *absolute Porosität* bzw. *absoluter Hohlraumanteil* Φ , n ; *durchflusswirksame Porosität* bzw. *durchflusswirksamer Hohlraumanteil* n_f

– Maßeinheit: dimensionslos [%, -]

Definition: Die absolute Porosität ist der Anteil des Hohlraumvolumens am Gesamtvolumen des Gesteins. Der durchflusswirksame Hohlraumanteil kennzeichnet den Hohlraumanteil, in dem verfügbares, nutzbares, d. h. frei bewegliches, Wasser enthalten ist, also beispielsweise kein Haftwasser. Der durchflusswirksame Hohlraumanteil bietet Durchlässigkeit, ist jedoch nicht direkt in diese umsetzbar, da zusätzlich auch die Größe, Gestalt und Verbindung der Hohlräume entscheidend sind.

Bestimmung: Messung am Bohrkern im Labor (Eigenschaft der Gesteinmatrix); Auswertung von bohrlochgeophysikalischen Verfahren; der durchflusswirksame Hohlraumanteil kann aus Markierungsversuchen oder u. U. aus Pumpversuchen bestimmt werden (Eigenschaft des Gebirges).

Weiterverarbeitung: Es besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität; er gilt spezifisch für eine Lithologie und kann nicht auf andere geologische Einheiten übertragen werden.

Kapillarmodelle, Kugelmodelle und Ansätze mittels der Theorie der Fraktale beschreiben einen Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität. Die Beziehung kann mit einer Funktion des Typs $K = x_1 \Phi + x_2 \Phi^2 + x_3 \Phi^{10}$ ausgedrückt werden, die ebenfalls nur für eine bestimmte Lithologie gilt. Eine gerin-

ge Änderung der Porosität wirkt sich demnach stark auf die abgeleitete Permeabilität K aus.

Wertebereich: 0–30 % (absolute Porosität); 0-15 % (durchflusswirksame Porosität)

3.6 **Speicherkoefizient**

(storage coefficient)

Parameter: *spezifischer Speicherkoefizient* S_s

– Maßeinheit: m^{-1}

Parameter: *Speicherkoefizient* S

– Maßeinheit: dimensionslos [-]

Definition: Der spezifische Speicherkoefizient S_s ist definiert als die Änderung des gespeicherten Wasservolumens je Volumeneinheit des Grundwasserraums bei Änderung der Druckhöhe, bzw. bei Absenkung um einen Meter Wassersäule. Er wird in gespannten Aquiferen maßgeblich von der Kompressibilität bestimmt. Der Speicherkoefizient ist analog zur Transmissivität und dem k_f -Wert das Integral des spezifischen Speicherkoefizienten über die Grundwassermächtigkeit (Gleichung 6a-c). Der Speicherkoefizient S ist damit ein Maß für die Änderung des gespeicherten Wasservolumens ΔV pro Oberflächeneinheit A bei einer Absenkung Δh um einen Meter ($S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h}$). Nur der Speicherkoefizient wird direkt aus Pumpversuchen ermittelt.

$$S = \int S_s dz \quad (6a)$$

(vgl. Abschn. 3.4). Ist der Aquifer (mit der Mächtigkeit H) homogen und isotrop, so gilt

$$S = S_s \cdot H \quad (6b)$$

Bei einem Schicht- (Stockwerks-)aufbau gilt entsprechend

$$S = \sum S_{s,i} \cdot H_i \quad (6c)$$

Bestimmung: Auswertung von Pumpversuchen (vgl. Abschn. 4.5).

Wertebereich: In gespannten Aquiferen liegt der spezifische Speicherkoefizient bei 10^{-6} – $10^{-7} m^{-1}$. Der Speicherkoefizient kann bis um etwa zwei Größenordnungen ansteigen.

3.7 **Produktivitätsindex, Injektivitätsindex**

(production index, injection index)

Parameter: *Produktivitätsindex* PI , *Injektivitätsindex* II

– Maßeinheit: $m^3 s^{-1} MPa^{-1}$

Definition: Der Produktivitätsindex PI beschreibt die Förderrate in Abhängigkeit von der Druckabsenkung. Für Injektionsbohrungen ist das Analogon zum Produktivitätsindex der Injektivitätsindex II . Er beschreibt die Injektionsrate in Abhängigkeit von der Druckerhöhung.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Einheiten ergibt sich die folgende Umrechnungstabelle:

Einheit	$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$	$\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{MPa}^{-1}$	$\text{l s}^{-1} (\text{m WS})^{-1}$
$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$	1	3600	9,806650
$\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{MPa}^{-1}$	$0,278 \cdot 10^{-3}$	1	$2,724 \cdot 10^{-3}$
$\text{l s}^{-1} (\text{m WS})^{-1}$	0,101971	367,098	1

Bestimmung: Der Index wird in der Regel aus hydraulischen Tests bestimmt, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei kurzen Testzeiten wegen der noch instationären Verhältnisse die Absenkungswerte noch nicht konstant sind. Der Produktivitätsindex ist jedoch nicht allein von den Eigenschaften des Untergrundes sondern auch von denen der Bohrung (Brunnenspeicherung, Skin) abhängig.

Der Produktivitätsindex kann unter Zuhilfenahme der Brunnengleichung von THIEM (vgl. Abschn. 4.5) für vorgegebene Absenkungen s ($p = \rho \cdot g \cdot s$) und Bohrlochradien r rechnerisch abgeschätzt werden, wenn der k_f -Wert, die Aquifermächtigkeit H und die Reichweite des Absenkungstrichters R bekannt sind:

$$PI = \frac{Q}{s} = 2\pi \cdot k_f \cdot H \frac{1}{\ln \frac{R}{r}} \quad (7)$$

Der auf diese Weise ermittelte Produktivitätsindex muss mittels der Dichte ρ_F und der Erdbeschleunigung g in die übliche Dimensionierung umgeformt werden.

Für einen idealen Aquifer und bei gleich bleibenden Fluideigenschaften und -bedingungen ist der Injektivitätsindex, falls der Öffnungsdruck des Gebirges nicht überschritten wird (elastische oder druckmechanische Verformung), identisch mit dem Produktivitätsindex. Da die hierfür aufzubringenden Druckdifferenzen von der Viskosität und Dichte des Fluids abhängig sind und da vor allem die Viskosität stark temperaturabhängig ist, ist der Injektivitätsindex bei Geothermiebohrungen (Injektion von abgekühltem Wasser) häufig kleiner als der Produktivitätsindex (Förderung von heißem bzw. warmem Wasser). Das bedeutet, dass für das Verpressen des abgekühlten Wassers eine höhere Druckdifferenz aufgebracht werden muss als für das Fördern der gleichen Rate.

3.8 Weitere Parameter

Neben diesen wichtigsten hydraulischen Parametern sind noch die **Dispersion** D [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] und die **Dispersivität** α [m] von Bedeutung (engl.: dispersion, dispersivity). Sie stellen ein Maß für die Vermischung und Verteilung von Fluiden dar und spielen daher insbesondere beim Dublettenbetrieb für die Temperaturobreitung im Untergrund eine Rolle. Die Dispersion ist von der Größe der Fließgeschwindigkeit abhängig. Die Bandbreite der Werte ist daher sehr groß und reicht i. a. von 10^{-9} bis auf über $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$. Bei der Dispersivität liegen die meisten Werte zwischen 10^{-1} – 10^3 m.

Der Absenkungs- und Wiederanstiegsvorgang bzw. der Druckverlauf in einer Förderbohrung werden neben von den o. g. Parametern außerdem noch markant von der **Brunnenspeicherung** C [$\text{m}^3 \text{Pa}^{-1}$] und dem **Skinfaktor** s_F [-] bestimmt. Unter Brunnenspeicherung versteht man die Eigenkapazität eines Brunnens (engl.: wellbore storage). Der Skinfaktor (engl.: skinfactor) ist eine Veränderung der geohydruli-

schen Eigenschaften in unmittelbarer Umgebung des Brunnens, die durch den Bohrvorgang, den Ausbau oder den Betrieb des Brunnens hervorgerufen worden sein kann. Der Skinfaktor kann Werte zwischen -5 und $+\infty$ annehmen.

4 Hydraulische Tests

4.1 Einbohrlochverfahren

Hydraulische Tests sind Untersuchungsmethoden bzw. -verfahren, die in einem Bohrloch durchgeführt werden und mit denen hydraulische Parameter ermittelt werden können. Zu diesen Parametern zählen vor allem die Transmissivität (Abschn. 3.4) und der Speicherkoeffizient (Abschn. 3.6). Aus der Transmissivität kann in einem homogenen, isotropen Aquifer bei Kenntnis der Aquifermächtigkeit H der Durchlässigkeitsbeiwert k_f (Abschn. 3.3) ermittelt werden. Nachstehend wird eine Zusammenstellung der für Tiefbohrungen wichtigsten Testverfahren gegeben (NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE & NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1997).

Hydrothermale Nutzungen erfolgen fast ausschließlich aus Festgesteins-Grundwasserleitern, in denen grundsätzlich gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen. Für die Auswertung der Tests steht i. d. R. nur ein Bohrloch, die Förderbohrung, zur Verfügung. Für diese Einbohrlochverfahren gibt es verschiedene Durchführungsmöglichkeiten (vgl. Abb. 1):

- Tests im offenen Bohrloch ohne oder mit Packer (Einfach- oder Doppelpacker)
- Tests in ausgebauten Beobachtungsbohrungen

Hydraulische Tests, die in offenen Bohrlöchern ohne Packer durchgeführt werden, lassen nur Aussagen über die gesamte Bohrlochstrecke zu. Die ermittelten hydraulischen Parameter wie Durchlässigkeit, Permeabilität oder spezifischer Speicherkoeffizient sind nur dann repräsentativ, wenn im Untergrund gleichförmige Bedingungen vorliegen oder wenn durch zusätzliche Informationen, beispielsweise Flowmeter-Logs, Leitfähigkeits-Logs oder Temperatur-Logs, eine Gewichtung vorgenommen werden kann.

Für hydraulische Tests in offenen Bohrlöchern mit Packer ist eine Testgarnitur notwendig, die aus einem Testgestänge mit Testventil und ein oder zwei Packern besteht. Ein Packer ist eine 0,5–1 m lange armierte Gummimanschette, die mechanisch oder hydraulisch-pneumatisch verformbar ist. Diese soll im eingebauten (verformten) Zustand das zu testende Intervall hydraulisch abdichten. Um einen dichten Packersitz zu erreichen, muss das Gebirge standfest sein und eine glatte Bohrlochwand ohne vertikale Klüfte aufweisen. Es gibt Packergarnituren, die oberhalb und unterhalb des Testbereiches den Druck und die Temperatur aufzeichnen, so dass der dichte Sitz der Packer überprüft werden kann. Durch die hydraulischen Testventile, die durch Gas- oder Wasserdruck betätigt werden, können während des Tests beliebig viele Fließ- und Schließphasen ausgeführt werden. Die hydraulisch wichtigen Testintervalle werden anhand der geologischen Aufnahme und / oder geophysikalischer Bohrlochmessungen festgelegt.

Einfachpackertests werden häufig dann beim Abteufen einer Bohrung durchgeführt, wenn sich z. B. durch Zutritte von Formationswässern oder durch Spülungsverluste Wasserwegsamkeiten andeuten. Das Testgestänge mit einem einzelnen Packer wird

in den gewünschten Bereich eingebaut und dichtet so das Testintervall zwischen Packer und Bohrlochsohle gegen den Ringraum über dem Packer ab (Abb. 1).

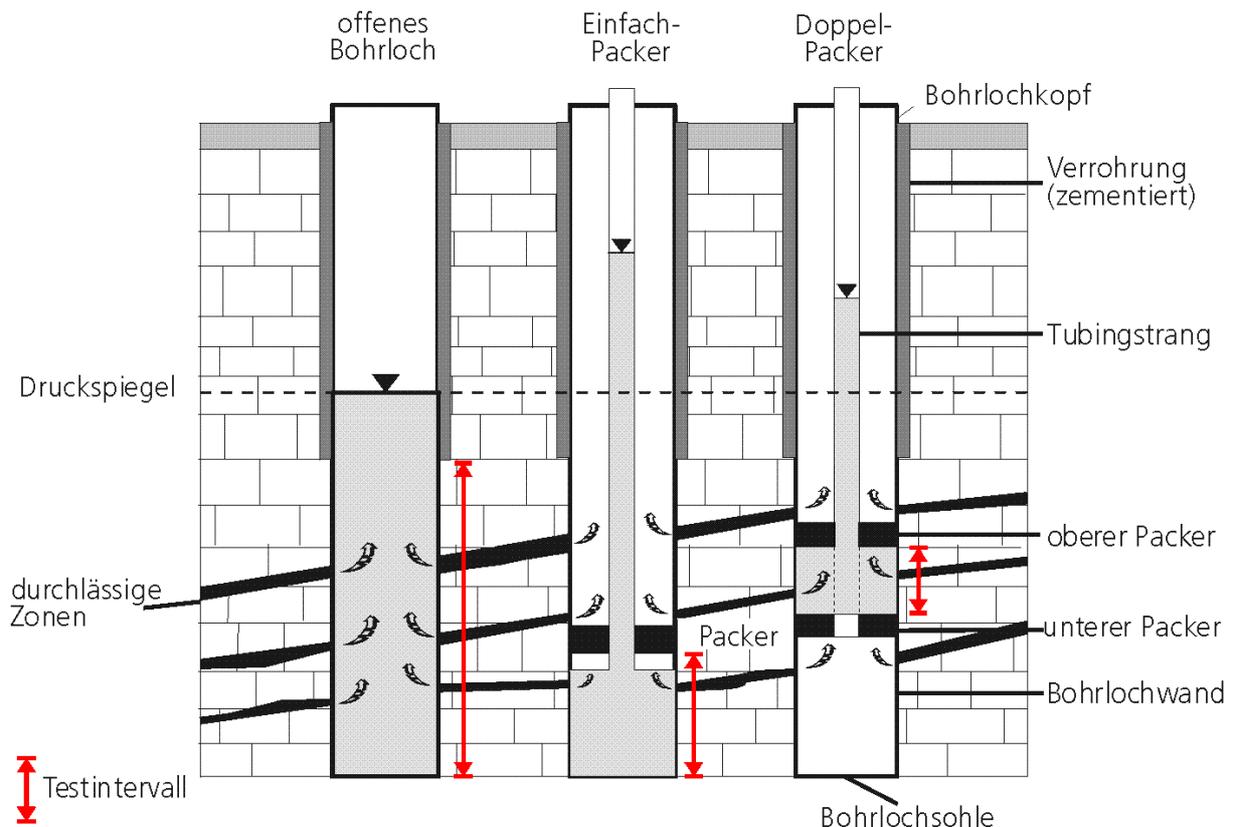


Abb. 1: Verschiedene Durchführungsmöglichkeiten für hydraulische Tests in Bohrungen

Die Durchführung von Doppelpackertests erfolgt normalerweise nach dem Abteufen eines größeren Bohrlochabschnittes. Das Testgestänge ist hierfür mit zwei Packern ausgestattet, die ein Testintervall im Bohrloch von ca. 1,5–5 m gezielt isolieren und testen. Gemessen werden dabei Temperatur und Druck im Testintervall und je nach Testgarnitur auch ober- und unterhalb davon.

Bei Tests in ausgebauten Beobachtungsbohrungen ist die Verwendung von Packern nur dann sinnvoll, wenn die Packer im Bereich eingebauter Dichtungen installiert und somit durch eine hydraulische Isolation bestimmte Testintervalle separat untersucht werden können. Auf Umläufigkeiten ist zu achten.

4.2 Testprinzip

Das Testprinzip ist bei allen hydraulischen Tests in Bohrungen dasselbe: Der im Testintervall (bzw. Aquifer) gemessene Anfangsdruck dient als Referenzdruck bzw. Ruhewasserspiegel. Bei Packertests wird dieser Anfangsdruck nach dem Setzen des Packers gemessen. Während einer so genannten Compliance-Periode bauen sich in Tiefbohrungen externe Störungen i. d. R. ab (Ausnahme: Gezeiteneinwirkungen).

Im ersten Testschritt wird der Anfangsdruck im Testintervall durch Förderung oder Injektion von Wasser (in dichtem Gestein: Gas) künstlich verändert. Die Förderung (Withdrawal) bewirkt eine Druckabsenkung, die Injektion (Injection) eine Druckerhöhung. Im zweiten Testschritt wird die Förderung bzw. Injektion beendet und die Erho-

lung des Drucks bis zum Formationsdruck, dem ungestörten Gebirgsdruck, beobachtet. Anfangs- und Formationsdruck sollten gleich sein.

Der Testauswertung werden die zeitliche Veränderung der Fließraten und Druckhöhen zu Grunde gelegt (instationär). Je länger der hydraulische Test dauert, desto größer ist der vom Drucksignal erfasste Raum. Bohrlochnahe Bereiche sind möglicherweise durch das Bohren oder den Ausbau der Bohrung beeinträchtigt (Skin-Effekt). Tests in großkalibrigen Bohrungen oder in Geringleitern werden zudem in der Anfangsphase von der Eigenkapazität der Bohrung (Brunnenspeicherung) überprägt. Aus Kostengründen werden Tests in Tiefbohrungen so kurz wie möglich durchgeführt. Vielfach wird kein vollständiger Druckausgleich erreicht. Werden die einzelnen Testabschnitte oder die Testschritte zu kurz bemessen, so können keine Aussagen im weiter vom Bohrloch entfernten Bereich (z. B. über Aquiferparameter oder Aquiferränder) getroffen werden.

Wird anstelle des Basisdrucks der Wasserstand (oder ein Druck deutlich oberhalb des Testhorizonts) gemessen, so muss bei Tiefbohrungen der gemessene Wasserstand von seiner thermischen Beeinflussung getrennt werden. Da die Dichte von Wasser temperaturabhängig ist, haben gleichschwere Wassersäulen mit verschiedenen Temperaturen unterschiedliche Längen. Zwar ist der Dichteunterschied an sich sehr gering, bei Wassersäulen von mehreren hundert Metern kann die Längendifferenz jedoch oft mehrere Meter betragen. Die Wassertemperatur in einer Bohrung passt sich im Ruhestand den jeweiligen Gesteinstemperaturen an. Bei Wasserentnahme aus der Bohrung strömt das warme Wasser aus den tieferen Bereichen rasch nach oben, was eine Erwärmung der gesamten Wassersäule zur Folge hat. Deshalb kann der Wasserspiegel zu Beginn eines Pumpversuchs aufgrund der temperaturbedingten Dichteänderung zunächst ansteigen anstatt abzusinken. Zur Auswertung muss die Absenkung bzw. die Länge der Wassersäule auf eine definierte Temperatur umgerechnet werden, was eine Dichtekorrektur der Wassersäule für jeden Messwert notwendig macht (STOBER 1986).

4.3 Mess- und Registriergeräte

Für Tests ohne Packer im offenen Bohrloch und in ausgebauten Beobachtungsbohrungen sind Messgeräte zur Ermittlung von Durchfluss, Druck und Temperatur nötig. Bei Packertests erfolgt die Messung von Temperatur und Druck im Testintervall und darüber bei Doppelpackertests auch darunter. Je nach Einsatzbedingungen variieren die Ansprüche an die Geräte hinsichtlich Auflösung, Genauigkeit, Temperatur- und Druckstabilität. Die genaue und nachvollziehbare Teufenzuordnung zur Messung ist für die Auswertung der Druckmessung unabdingbar.

4.4 Testverfahren

Es existiert eine große Anzahl hydraulischer Test-Verfahren. Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens spielt neben der Zielsetzung vor allem die zu erwartende Gesteinsdurchlässigkeit eine Rolle. Abb. 2 zeigt schematisch die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Tests in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit.

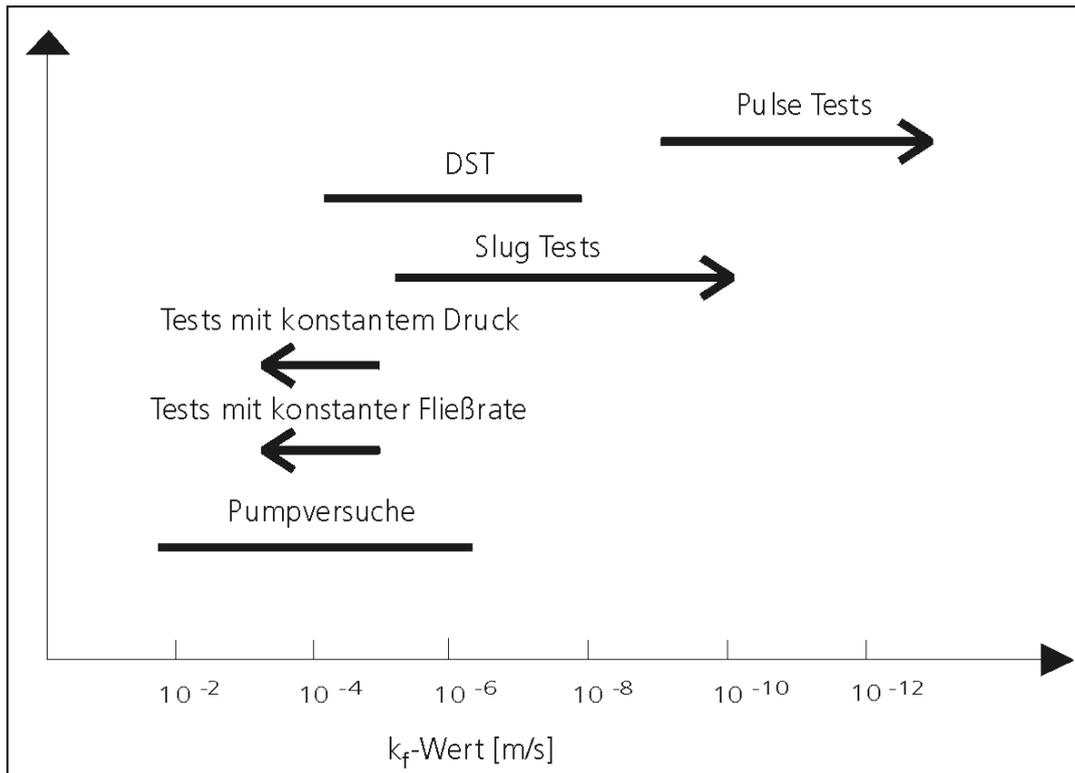


Abb. 2: Anhaltspunkte für den Einsatz hydraulischer Testverfahren in Abhängigkeit von den Gebirgs-Durchlässigkeiten

➤ Pumpversuch

Nach DVGW REGELWERK W111 ist ein Pumpversuch ein vergleichsweise aufwendiges, kontrollierbares Feldexperiment, bei dem aus einem oder mehreren Brunnen [bzw. Bohrungen] Grundwasser entnommen wird. Ziel eines Pumpversuches ist es, die Leistung der (des) Brunnen(s) [bzw. die mögliche Förderleistung aus dem Testintervall im Bohrloch], die hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters und der angrenzenden Gesteine in situ sowie die Beschaffenheit des Grundwassers zu bestimmen. Bei der Auswertung von Pumpversuchen kann der Einfluss einer begrenzten Anzahl exakt definierter Randbedingungen berücksichtigt werden. Ein Pumpversuch ersetzt nicht eine weitergehende hydrogeologische Untersuchung und gibt nur beschränkt Aussagen zum Wasserhaushalt.

Da für die Durchführung von Pumpversuchen bei tiefen Bohrungen meist keine weiteren Bohrungen in der näheren Umgebung zur Verfügung stehen, hängt die hydraulische Auswertung allein vom zeitlichen Druckverlauf bzw. der Absenkung und dem Wiederanstieg in der Entnahmebohrung ab.

Zur Auswertung von Pumpversuchen siehe Abschnitt 4.5.

➤ Injektionstest

Ein Injektionstest stellt im Prinzip einen umgekehrten Pumpversuch dar. Beim Injektionstest wird Wasser in das Gebirge eingebracht. Dies kann entweder direkt im offenen Bohrloch oder über ein Packersystem in einem definierten Bohrlochabschnitt geschehen. Die Injektionsrate ist frei wählbar. Zunächst wird der durch die Injektion hervorgerufene Druckaufbau gemessen; nach dem Ende der Injektion wird anschließend der Druckabbau aufgezeichnet.

Bei der Auswertung können Injektionstests wie Pumpversuche mit negativer Entnahmerate behandelt werden, soweit bestimmte Maximaldrücke, ab welchen eine elastische Verformungen oder ein Aufreißen des Gebirges hervorgerufen wird, nicht überschritten werden.

➤ **Test mit konstanter Fließrate (Spezielle Art eines Pumpversuches bzw. Injektionstests)**

Tests mit konstanter Fließrate werden meist als Pumpstest (Aquifertest) durchgeführt und dienen der Ermittlung der Aquiferparameter (z. B. Speicherkoeffizient, Transmissivität). Diese sind bei Gesteinen mit einer mittleren bis hohen Durchlässigkeit anwendbar. Mittels einer regelbaren Pumpe wird eine konstante Fließrate eingestellt. In der Pumpphase wird eine kontinuierliche Messung der Druckänderung durchgeführt und am Ende die Druckerholung beobachtet (vgl. Abb. 3). Meistens sind hochgenaue Druckmessungen leichter zu verwirklichen als hochgenaue Durchflussmessungen.

Wird mit einer zu hohen Fließrate gepumpt, so kann die Pumpe beim Fördertest trockenlaufen. Beim Injektionstest können sich bei geringen Durchlässigkeiten hohe Drücke einstellen, welche technische Probleme bereiten und das Gebirge elastisch oder bruchmechanisch beanspruchen können.

Zur Auswertung können jeweils in Abhängigkeit vom zugrunde liegenden Aquifermodell (STOBER 1986) verschiedene Typkurvenverfahren, im Idealfall bspw. das Typkurvenverfahren von THEIS (1935), oder das Geradlinienverfahren von COOPER & JACOB (1946) oder numerische Auswerteverfahren herangezogen werden.

In der Regel können bei diesem Testverfahren umfangreiche Erkenntnisse über die hydraulischen Eigenschaften des Aquifers und seiner Begrenzungen ermittelt werden.

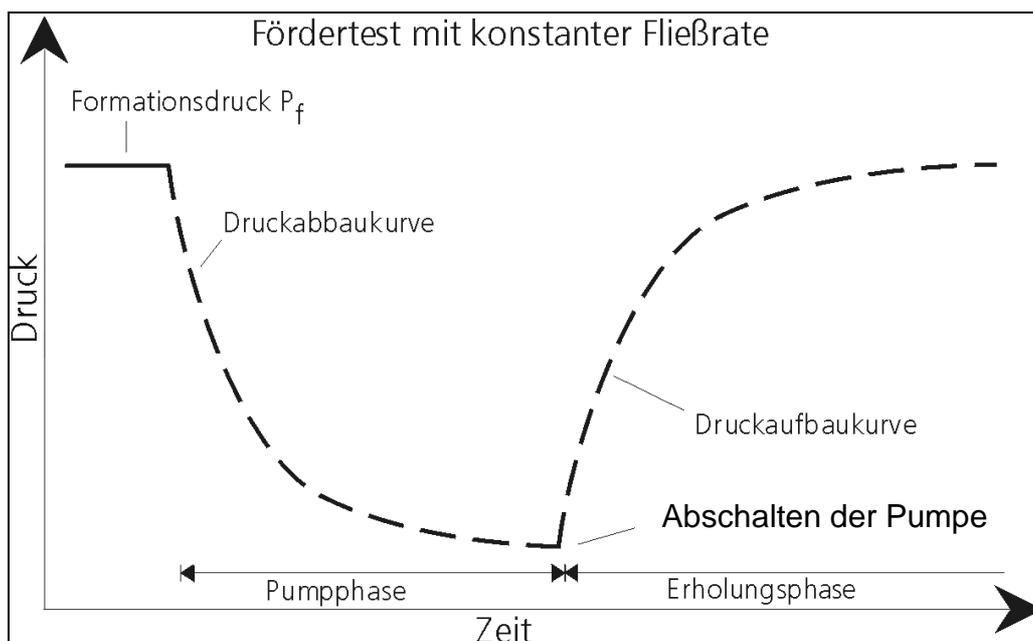


Abb. 3: Druckverlauf beim Fördertest

➤ **Test mit konstantem Druck (Spezielle Art eines Pumpversuches bzw. Injektionstests)**

Der Test mit konstantem Druck kommt bei Gesteinen mit einer mittleren bis hohen Durchlässigkeit zum Einsatz. Mit einer regelbaren Pumpe wird das Einstellen eines konstanten Drucks ermöglicht, so dass ein Volumenstrom (mit konstantem Druck) injiziert oder gefördert und eine kontinuierliche Messung der Durchflussänderung durchgeführt werden kann. In der anschließenden Erholungsphase wird die Druckerholung beobachtet. Wenn im Untergrund artesische Bedingungen herrschen, wird zusätzlich der freie Auslauf gemessen. Tests mit konstantem Druck erlauben i. d. R. die Ermittlung der Transmissivität T und des Speicherkoeffizienten S .

Zur Auswertung können je nach Aquifermodell bspw. das Typkurvenverfahren von JACOB & LOHMANN (1952) oder numerische Auswerteverfahren herangezogen werden.

➤ **Slug-Test**

Der Slug-Test wird bei geringen bis mittleren Gesteindurchlässigkeiten angewendet. Er dient der Ermittlung der Transmissivität, bzw. abgeleitet daraus der Berechnung der Permeabilität oder des Durchlässigkeitsbeiwertes, des Speicherkoeffizienten sowie der Brunnenspeicherung und des Skin-Faktors.

Bei diesem hydraulischen Test wird der Druck im Bohrloch oder Testintervall plötzlich verändert und der anschließende Druckaufbau oder Druckabbau gemessen und ausgewertet.

In Tiefbohrungen ist für die Durchführung von Slug-Tests eine spezielle Testgarnitur notwendig.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Durchführung:

- Teststrang mit offenem Ventil einbauen
- Packer setzen
- Testventil schließen
- Druck im Teststrang durch Entnahme von Wasser (Slug-Withdrawal-Test, manchmal auch Bail-Test genannt) oder Zugabe (Slug-Injection-Test, manchmal auch Slug-Test genannt) verändern
- Testventil öffnen

oder

- Leeren Teststrang mit geschlossenem Testventil einbauen (Slug-Withdrawal-Test)
- Testventil öffnen
- Druckänderung über die Zeit bei offenem Testventil messen.

Wenn das Testventil geöffnet wird, überträgt sich die Druckveränderung schlagartig auf das Testintervall. In der anschließenden Fließphase erfolgt ein Druckausgleich, indem je nach Druckgefälle Wasser aus dem Gebirge zufließt (Slug-Withdrawal-Test) oder ins Gebirge abfließt (Slug-Injection-Test; Abb. 4).

Die Reichweite des Slug-Tests beschränkt sich i. d. R. auf die unmittelbare Bohrlochumgebung. Die Versuchsdauer hängt von der Durchlässigkeit des Gebirges ab und kann bei niedrigen k_f -Werten einige Tage dauern.

Für eine Auswertung ohne Berücksichtigung des Skin-Effekts kann bspw. das Typkurvenverfahren von COOPER et al. (1967) herangezogen werden, für eine Auswertung mit Skin-Effekt bspw. das Typkurvenverfahren von RAMEY et al. (1975).

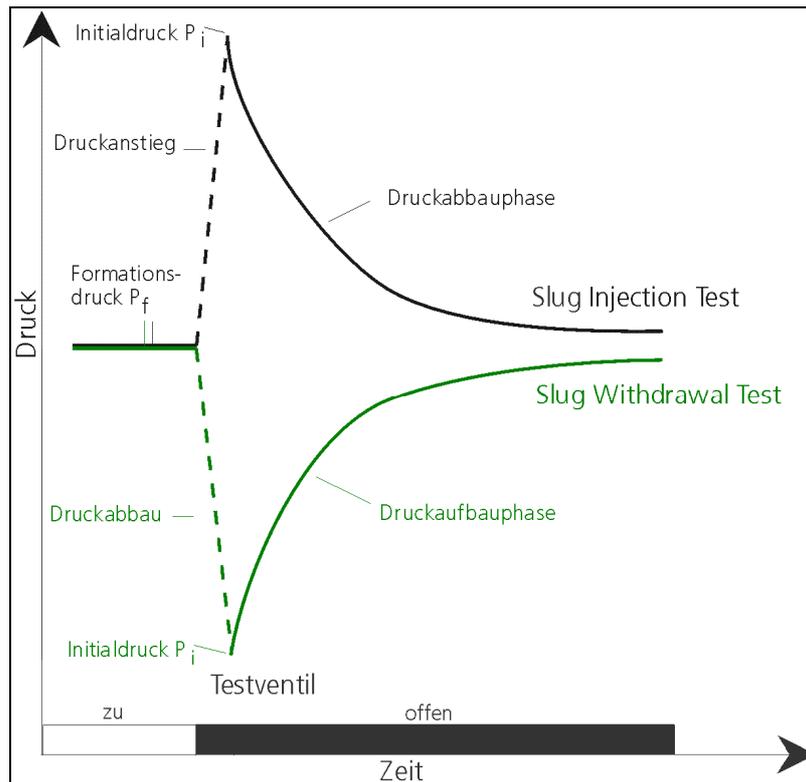


Abb.4: Druckverlauf beim Slug-Test

➤ Slug/Bail-Test

Der Slug/Bail-Test ist eine versuchstechnische Abwandlung des Slug-Tests. Der Anwendungsbereich liegt wie beim Slug-Test bei geringen bis mittleren Gesteinsdurchlässigkeiten. Die Auswertung erfolgt analog des Slug-Tests.

Das Prinzip des Slug/Bail-Tests beruht wie beim Slug-Test auf einer schlagartigen Veränderung des Drucks. Im Gegensatz zu diesem geschieht dies nicht durch die Zugabe oder Entnahme von Wasser, sondern durch das Eintauchen und Bergen eines Verdrängungskörpers. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich, wird durch den Verdrängungskörper eine Aufhöhung des Grundwasserspiegels hervorgerufen, deren Abklingen zum Ruhewasserspiegel gemessen wird. In der folgenden Bail-Phase wird der Wiederanstieg des durch die Bergung des Verdrängungskörpers abgesenkten Grundwasserspiegels bis auf das Niveau des Ruhewasserspiegels beobachtet.

Zur Auswertung kann bspw. das Verfahren von HVORSLEV (1951) oder das Typkurvenverfahren von COOPER et al. (1967) herangezogen werden. Speziell für gering durchlässiges Gebirge können die Typkurven von PAPADOPULOS et al. (1973) verwendet werden. Daneben existieren numerische Auswerteverfahren.

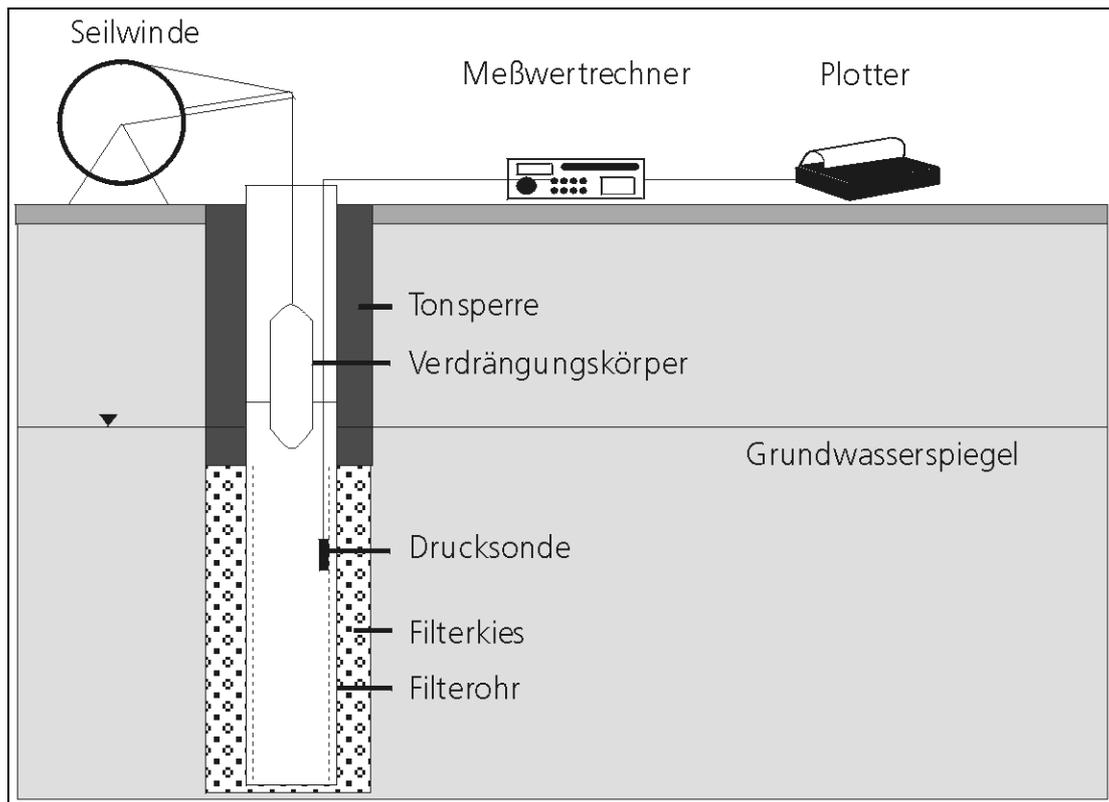


Abb. 5: Messeinrichtung für Slug/Bail-Test

➤ **Pulse-Test**

Der Pulse-Test, bei dem Permeabilität, Brunnenspeicherung und Skin-Faktor ermittelt werden, kommt bei sehr geringen bis geringen Gebirgsdurchlässigkeiten zum Einsatz. Durch entsprechenden Packereinsatz kann er zur Untersuchung von Durchlässigkeiten einzelner Gebirgsabschnitte genutzt werden.

Beim Pulse-Test wird wie beim Slug-Test (mit der gleichen Testausrüstung) eine Druckveränderung im Testintervall hervorgerufen. Das Testventil wird dabei nur für einen kurzen Zeitraum geöffnet und danach sofort wieder verschlossen (vgl. Abb. 6). Anschließend wird der Druckausgleich bis zum Formationsdruck im Testintervall gemessen.

Da der Test in Geringleitern durchgeführt wird und die eigentliche Versuchsdauer (Öffnen des Testventils) sehr kurz ist (einige Stunden), ist die Eindringtiefe ins Gebirge nur sehr gering. Dadurch ist die ermittelte Permeabilität nur für die direkte Bohrlochumgebung repräsentativ. Darüber hinaus ist die Auswertung des Tests durch Bohrlocheffekte wie Brunnenspeicherung und Skin-Faktor beeinflusst. Der Druckabfall oder -anstieg verläuft durch den kurzen Druckpuls viel steiler als beim Slug-Test. Dementsprechend sind die Testzeiten hier wesentlich kürzer (einige Stunden).

Zur Auswertung kann bspw. das Typkurvenverfahren von RAMEY et al. (1975) sowie numerische Auswerteverfahren herangezogen werden.

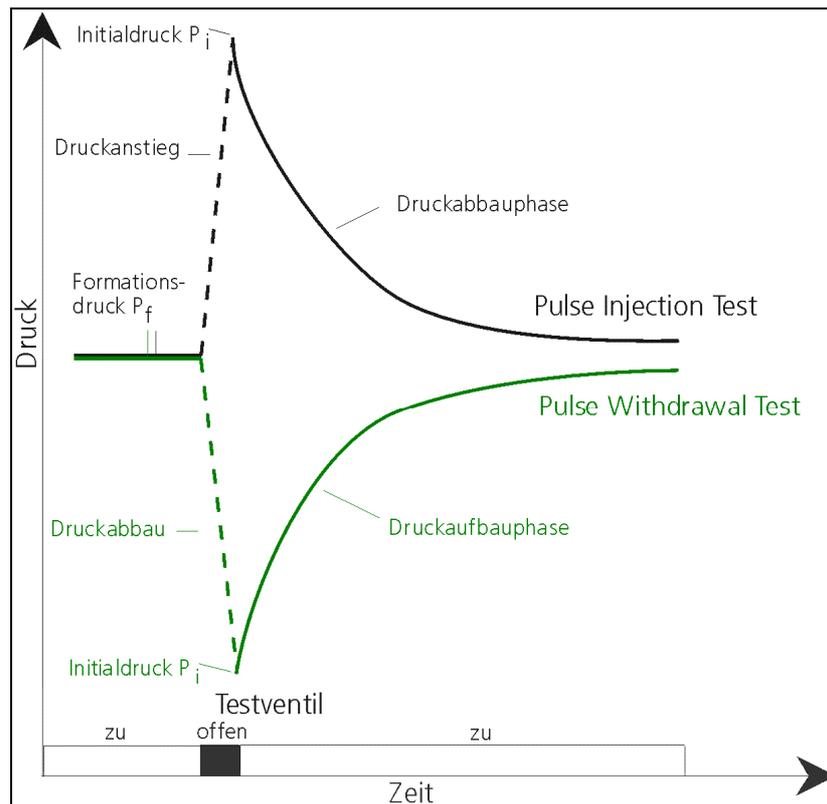


Abb. 6: Druckverlauf beim Pulse-Test

➤ **Gestängetest oder Drill-Stem-Test (DST)**

Der Drill-Stem-Test (DST) wird bei geringen bis mittleren Gesteinsdurchlässigkeiten angewendet. Mit dem DST können die Permeabilität, die Brunnenspeicherung und der Skin-Faktor ermittelt werden. Beim DST sollte sich die Testzone mindestens 10 m unterhalb des Grundwasserspiegels befinden.

Der Name Drill-Stem-Test leitet sich von der englischen Bezeichnung für Bohrstrang „Drill Stem“ ab.

Wie in Abbildung 7 zu sehen gliedert sich der DST in eine erste kurze Fließphase, eine erste Schließphase, eine zweite lange Fließphase und eine zweite lange Schließphase. Durch das Öffnen des Ventils wird ein Unterdruck im Testabschnitt und ein Zufließen in das Bohrloch erreicht. In der Schließphase (Ventil geschlossen) kommt es zum Druckaufbau möglichst bis zum Formationsdruck. Anschließend wird das Ventil für eine längere Fließphase wieder geöffnet und der Prozess beginnt von neuem. Mittels Druckmessgeräten wird der entsprechende Fließ- und Schließdruck über einen längeren Zeitraum gemessen. Da sich auftretende Temperaturschwankungen im Test stark auf den Druckverlauf auswirken können, ist es notwendig, neben dem Druck auch die Temperatur aufzuzeichnen.

Der Zeitaufwand beim DST ist von der Standfestigkeit des Gebirges und dessen Durchlässigkeit abhängig.

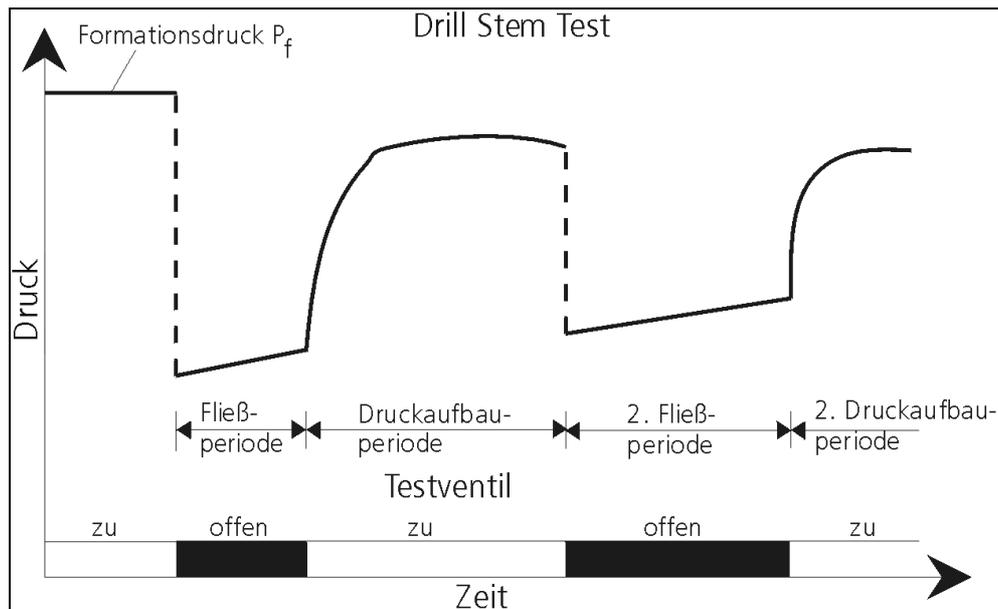


Abb. 7: Schema des Drill-Stem-Tests

Wird der stationäre Fließzustand erreicht, so kann für die Auswertung bspw. das Geradenlinienverfahren von HORNER (1951) herangezogen werden; für frühe und späte Druckverläufe eignet sich bspw. das Typkurvenverfahren von GRINGARTEN et al. (1979). Darüber hinaus existieren für eine Vielzahl möglicher Formationstypen, Anfangsdruckverläufe, brunnen spezifische Einflüsse (Brunnenspeicherung, Skin-Effekt) und späten Druckverlaufsphasen Musterkurven. Außerdem werden numerische Verfahren für die Auswertung eingesetzt.

➤ Interferenzttest

Für einen Interferenzttest sind mehrere Beobachtungsbohrungen nötig, da damit der hydraulische Kontakt zwischen unterschiedlichen Bohrungen, die Reichweite und Form des Absenkungstrichters sowie die Transmissivitätsverteilung im Umfeld der Bohrung bestimmt werden kann.

4.5 Auswertung von Pumpversuchen

Je nach Dauer eines Pumpversuches sowie der Geometrie und Hydraulik des Grundwasserleiters (GWL) bleibt die Zuströmung des Grundwassers zu einem Entnahmehrbrunnen entweder instationär, oder es stellen sich nach einer gewissen Förderzeit (quasi-) stationäre Bedingungen ein. Da bei Tiefengrundwasserleitern ausschließlich gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen, werden im Folgenden nur Auswertemethoden für gespannte Verhältnisse vorgestellt. Bei tiefen Grundwasserleitern steht zur Auswertung von Pumpversuchen nur der Zeit-Absenkungsverlauf im Förderbrunnen zur Verfügung (Einbohrlochverfahren).

➤ Stationäre Verfahren

Die Geometrie des Absenktrichters ändert sich nach dem Erreichen des Beharrungszustandes praktisch nicht mehr und das hydraulische Gefälle bleibt an jedem Punkt des GWL konstant.

Bei derartigen stationären Bedingungen kann die Transmissivität T durch die modifizierte Formel nach THIEM berechnet werden:

$$T = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot (h_0 - h)} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (8)$$

mit: Q = Förderrate [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
 h_0 = Ruhegrundwasserspiegelhöhe im Förderbrunnen [m]
 h = quasistationäre Wasserspiegelhöhe im Förderbrunnen [m]
 R = Reichweite des Absenkungstrichters [m]
 r = Brunnenradius bzw. wirksamer Brunnenradius r_w [m]

Zur Lösung der Formel ist die Abschätzung der Reichweite (R) des Absenktrichters notwendig. Diese kann über die Formeln von SICHARDT

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f} \quad (9)$$

mit: s = Absenkung im Brunnen [m]
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m s^{-1}]

oder nach KUSAKIN

$$R = 575 \cdot s \cdot \sqrt{k_f \cdot H} = 575 \cdot s \cdot \sqrt{T} \quad (10)$$

mit: H = Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]

sowie nach WEBER

$$R = c \cdot \sqrt{\frac{T \cdot t}{s}} \quad (11)$$

mit: t = Pumpzeit [s]
 c = Konstante ($2,82 < c < 3,46$)

grob abgeschätzt werden. Das stationäre Auswerteverfahren liefert daher nur Orientierungswerte für die Transmissivität.

Bei der Auswertung müssen der hydraulische Widerstand des Brunnens (Skinneffekt), die Brunnenspeicherung, die Neigung der Bohrung und die Vollkommenheit des Brunnens berücksichtigt werden.

➤ **Instationäre Verfahren**

Für die instationäre Auswertung von Pumpversuchen gibt es eine Vielzahl von Auswertemethoden. Bei der Auswertung der Pumpversuche sind aufgrund der hochtemperierten, hochmineralisierten und oft gasreichen Wässer Temperatur- und Dichteeffekte zu berücksichtigen. Diese Einflüsse erfordern eine Normierung der Druckwerte, um eine aussagekräftige Auswertung zu ermöglichen. Die im Test aufgezeichneten Messdaten können zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften des Testhorizontes (z.B. Transmissivität, Speicherkoeffizient) dienen, indem man sie mit den theoretischen Modellkurven vergleicht. Spezielle Modelle beziehen neben verschiedenen inneren Randbedingungen, den brunnenspezifischen (Brunnenspeicherung, Skin-Effekt) und den aquiferspezifischen Einflüssen (z. B. Doppelporositätsmedium, Klufansätze u.a.) auch äußere Randbedingungen wie Zuflüsse oder abdichtende Barrieren mit ein (STOBER 1986, KRUSEMAN & DE RIDDER 1991). Einen guten Überblick liefert auch das Arbeitsblatt des DVGW W111.

5 Laboruntersuchungen

5.1 Permeabilität

(vgl. Abschnitt 3.3)

Die Permeabilitäten der Gesteine werden mit zwei verschiedenen Verfahren bestimmt: ein instationäres und ein stationäres Verfahren.

Bei dem instationären Verfahren werden zwei Druckkammern unterschiedlichen Druckes über die Probe verbunden. Es wird die Zeit gemessen, bis ein Druckausgleich in beiden Kammern erfolgt. Aus der Druck-Zeit-Kurve kann nun die Permeabilität berechnet werden. Diese Messungen werden bei unterschiedlichen Drücken durchgeführt.

Beim stationären Verfahren erfolgt die Permeabilitätsbestimmung mittels eines Autoklaven, in dem mit Hilfe einer Wasserpumpe ein Druck bis 300 bar erzeugt werden kann, der auf die Mantelfläche der Probe wirkt. Die Proben, die senkrecht und parallel zur Foliation aus den Bohrkernen gebohrt werden, werden in einen Vitonschlauch eingebaut. Die so eingebaute und von einem Manteldruck umgebene Probe wird von Stickstoffgas durchströmt. Der jeweilige Vorder- bzw. Hinterdruck wird mit Druckaufnehmern gemessen und registriert. Außerdem wird der jeweilige Massendurchfluss vom Stickstoffgas gemessen und registriert. Aus den registrierten Daten lässt sich die Permeabilität der Proben bestimmen.

Bei der so bestimmten Permeabilität handelt es sich um die sogenannte scheinbare Permeabilität, da ein strömendes Gas an der Rohrwand (Porenwand) noch eine endliche Geschwindigkeit in Strömungsrichtung aufweist. Die Erhöhung des Gasdruckes erniedrigt diese Geschwindigkeit, so dass bei einem unendlichen Druck die Strömungsgeschwindigkeit null sein würde.

5.2 Porosität

(vgl. Abschnitt 3.5)

Die Bestimmung der Porosität erfolgt an druckentlasteten Proben unter Oberflächenbedingungen, d. h. die Bohrkern er erfahren durch die Druckentlastung bereits eine Volumenvergrößerung. Neben dieser Volumenvergrößerung ist noch zu berücksichtigen, dass während des Bohrens Mikrorisse entstehen können. Dies bedeutet für die Bestimmung der Porosität, dass die gemessene Porosität nicht gleich der insitu-Porosität ist.

Die Porositätsmessungen werden nach dem "Archimedischen Prinzip" durchgeführt. Zur Porositätsbestimmung sind daher drei verschiedene Wägungen notwendig. Als erstes wird die Trockenmasse $m_{trocken}$ der Probe bestimmt. Hierzu wird die Probe 24 Stunden unter Vakuum bei 80° getrocknet. Anschließend werden die Proben unter Vakuum mit destilliertem Wasser gesättigt. Nachdem man einen Vakuum-Exsikkator etwa 2 Stunden evakuiert hat, lässt man das destillierte Wasser vorsichtig in den Exsikkator einströmen bis die Proben vollständig vom Wasser bedeckt sind. Bevor nun die Tauch- und Nasswägungen durchgeführt werden, bleiben die Proben noch ca. 72 Stunden stehen. Zur Durchführung der Tauchwägungen (Bestimmung des Tauchgewichtes m_{tauch}) werden die Proben mit Hilfe einer Probenhalterung in einen mit destilliertem Wasser gefüllten Behälter getaucht.

Als dritte Wägung wird die Nasswägung zur Bestimmung des Nassgewichtes m_{nass} durchgeführt. Hierzu wird die Probe aus dem destillierten Wasser genommen und sorgfältig vom äußeren Wasserfilm befreit. Dieser Vorgang beinhaltet die größte Fehlerquelle, da man nie genau weiß, ob zuviel oder zuwenig vom äußeren Flüssigkeitsfilm entfernt wurde. Deshalb muss diese Wägung sehr sorgfältig und mehrmals durchgeführt werden. Aus den so bestimmten drei verschiedenen Massen lässt sich nun einfach die Porosität Φ bestimmen:

$$\Phi = \frac{m_{nass} - m_{trocken}}{m_{nass} - m_{tauch}} \quad (12)$$

5.3 Wärmeleitfähigkeit

(vgl. Abschnitt 2.1)

Die Wärmeleitfähigkeit kann mit einem sogenannten „Optischen Thermoscanner“ ermittelt werden (Abb. 8, 9). Die Messung basiert auf dem „Scannen“ einer Probenoberfläche mit einer fokussierten Wärmequelle und der kontaktlosen Temperaturmessung mittels Infrarot-Thermosensoren. Hierfür wird die Strahler- und Messeinheit an der Probe entlang bewegt. Die emittierte Licht- und Wärmestrahlung wird auf die Oberfläche der Probe fokussiert, wodurch die Probe aufgeheizt wird. In einem festen Abstand zum Strahler befinden sich Infrarot-Temperatur Sensoren, welche die Temperatur der Probe vor und nach dem Erhitzen messen. Für die Größe der Wärmeleitfähigkeit ist entscheidend, ob die Messungen an trockenen oder feuchten Bohrkerne durchgeführt wurden. Bei anisotrop ausgebildeten Gesteinen ist die Messung in verschiedenen Raumrichtungen durchzuführen.

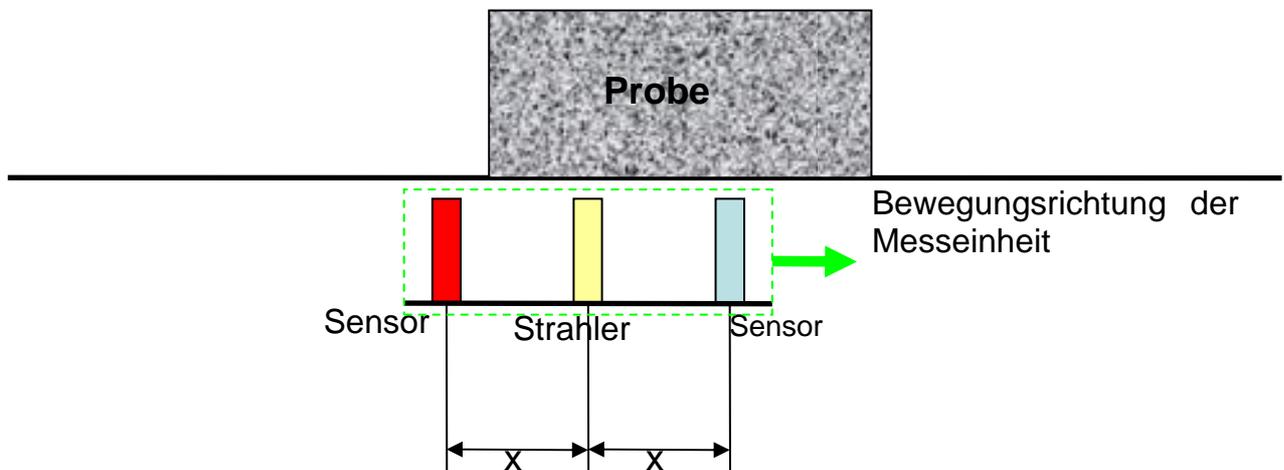


Abbildung 8: Messprinzip eines Thermoscanners



Abbildung 9: Thermoscanner

5.4 Gesteinsdichte

(vgl. Abschnitt 2.2)

➤ Dichtebestimmung an Kernstücken

Die Bestimmung der Dichte an Kernstücken erfolgt nach dem "Archimedischen Prinzip". Das Kernstück wird zweimal gewogen; zuerst erfolgt die Trockenwägung, wozu das Kernstück auf eine unter der Waage befindliche Gabel gelegt wird. Nach Bestimmung der Trockenmasse wird mit Hilfe einer Wasserwanne das Tauchgewicht bestimmt. Die Gabel wird immer bis zu einer bestimmten Markierung eingetaucht. Aus dem Tauchgewicht und der Dichte des Wassers lässt sich das Volumen des Kernstückes V bestimmen, was dann mit der Masse m zur Berechnung der Gesteinsdichte ρ dient:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

➤ Dichtebestimmung an Bohrklein (Cuttings)

Die Dichtebestimmung an Bohrklein erfolgt mit Pyknometern (Messgerät zur Bestimmung der Dichte von Festkörpern oder Flüssigkeiten), deren Volumen genau bekannt ist. Hierbei wird das Pyknometer einmal mit der trockenen Bohrkleinprobe und einmal mit einem Gemisch aus der Bohrkleinprobe und Wasser gewogen. Aus den gemessenen Massen und der Dichte des Wassers (bei entsprechender Mess-temperatur) lässt sich die Dichte des Bohrkleins bestimmen. Zur Vermeidung von Luftbläschen im Pyknometer, die das Volumen verfälschen können, wird das mit Wasser gefüllte Pyknometer jeweils mit einer Wasserstrahlpumpe evakuiert.

6 Bohrlochvermessungen

Bezüglich der Themen „Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern“ sowie „Praktische Bohrlochgeophysik“ wird auf das DVGW-REGELWERK W 110 und das Lehrbuch von FRICKE & SCHÖN (1999) verwiesen. In beiden Schriften ist die Thematik ausführlich erläutert.

7 Geometrische Eigenschaften

Die räumliche Ausdehnung eines geothermischen Reservoirs spielt für die geothermische Nutzbarkeit eine wichtige Rolle. Zudem ist die Geometrie des Reservoirs zu betrachten. Aus der Ausdehnung und Mächtigkeit kann das Volumen und der Energieinhalt des Reservoirs berechnet werden. Eine große Mächtigkeit erhöht bei gleicher Durchlässigkeit die Transmissivität und die mögliche Förderrate.

Untersuchungen in Bohrungen stellen die wichtigste Datenquelle für den Aufbau eines Untergrundmodells dar. Eine weitere wichtige Datenquelle für den Aufbau eines Untergrundmodells sind seismische Profile. Bohrungen stellen Punktinformationen dar, während seismische Sektionen 2D-Informationen in der Tiefe zeigen. Die 3D-Seismik kann ein räumliches Modell des Untergrundes liefern. Aufgabe ist es, aus meist unregelmäßig verteilten Punktinformationen sowie ggf. vorhandenen 2D-Informationen aus seismischen oder geoelektrischen Messungen ein dreidimensionales geologisches Modell aufzubauen. Das aus diesen Datenquellen generierte dreidimensionale geologische Modell beinhaltet die Lagerungsverhältnisse der Schichten sowie die Schichtmächtigkeit. Abhängig vom geologischen Bau und der Verteilung der relevanten hydraulischen und thermischen Parameter ergeben sich Aussagen zum Energieinhalt des Reservoirs. Für eine konsistente Interpretation müssen dem Anwender sowohl die exakte Lage der Belegpunkte als auch die Basisdaten zur Verfügung stehen.

8 Physikalisch-chemische Fluideigenschaften

Nachstehend sind die für geothermische Bohrungen wichtigsten physikalischen und chemischen Parameter der Tiefenwässer zusammengestellt. Für thermodynamische Berechnungen sowie für die Ermittlung von Lösungs- und Fällungsprozessen sind diese Parameter eine Grundvoraussetzung.

➤ **Dichte** des Fluids ρ_F [kg m^{-3}], density

Die Dichte wird von Druck und Temperatur beeinflusst. Reines Wasser hat unter Normaldruck seine größte Dichte bei 4 °C. Sie nimmt mit zunehmender Temperatur ab und mit ansteigendem Druck zu. Bei normalen geothermischen Gradienten dominiert der Temperatureffekt geringfügig, so dass mit zunehmender Tiefe mit einer Abnahme der Dichte zu rechnen ist. Einem Aufstieg von heißem Wasser stehen jedoch im Allgemeinen eine mit der Tiefe abnehmende Gesteinsdurchlässigkeit und eine zunehmende Mineralisation entgegen. Tiefenwässer können Gesamtlösungsinhalte (TDS) von einigen 100 g/kg aufweisen; damit nimmt auch die Dichte entsprechend zu.

Wertebereich: $0,8-1,5 \cdot 10^3$ [kg m^{-3}].

➤ **dynamische Viskosität** des Fluids μ [Pa s], dynamic viscosity

Die dynamische Viskosität eines Fluids ist ein Maß für seine Zähigkeit; sie ist fast ausschließlich temperaturabhängig. Zwischen 0 °C und 150 °C schwankt die dynamische Viskosität von Wasser im Vergleich zur Dichte um ein Vielfaches ($\mu = 0,2 - 1,75 \cdot 10^{-3}$ Pa s). Sie ist deshalb für das Fließverhalten thermaler Grundwässer von ausschlaggebender Bedeutung.

- **kinematische Viskosität** des Fluids ν [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], kinematic viscosity

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_F} \quad (14a)$$

Unter kinematischer Viskosität wird der Quotient aus dynamischer Viskosität und Dichte des Fluids verstanden.

- **Kompressibilität** eines Fluids c [Pa^{-1}], compressibility

Die Kompressibilität eines Fluids ist ein Maß für seine Volumenänderung pro Druckänderung bezogen auf das Ausgangsvolumen; sie verhält sich umgekehrt proportional zum Druck. Bei Temperaturen über $50 \text{ }^\circ\text{C}$ nimmt sie mit der Temperatur zu, während sie für Temperaturen unter $50 \text{ }^\circ\text{C}$ abnimmt. Die Kompressibilität liegt im Allgemeinen zwischen $4\text{--}5,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$.

- **Temperatur** des Fluids in der Lagerstätte

Für thermodynamische Berechnungen ist die Temperatur der Lagerstätte, aus der das geförderte Fluid stammt, eine wichtige Größe (vgl. Abschn. 1.2). Häufig liegen keine Temperaturen am Bohrlochtiefsten vor, sondern lediglich Werte, die am Bohrlochkopf gemessen wurden.

- **Gase, Gasgehalt** eines Fluids

Die Löslichkeit von Gasen im Wasser ist gasspezifisch und hängt von der Wassertemperatur, vom Druck (bei Gasgemischen vom Partialdruck) und vom Gesamtlösungsinhalt (TDS) ab. Die Löslichkeit eines Gases λ in l/l [-] lässt sich durch die HENRY-DALTON-Gleichung beschreiben:

$$\lambda = K' \cdot p \quad (14b)$$

wobei p der Druck bzw. Partialdruck ist und K' ein temperaturabhängiger Proportionalitätsfaktor. Gewöhnlich wird für K' der BUNSENSche Absorptionskoeffizient α verwendet, der auf gelöste Volumina bezogen ist. Die Löslichkeit eines Gases ist somit bei einer gegebenen Temperatur dem Druck, in einem Gasgemisch seinem Partialdruck, direkt proportional. Die Löslichkeit von Gasen nimmt mit zunehmender Temperatur ab; bei konstantem Druck gilt nach GAY-LUSSAC:

$$\lambda = \alpha \cdot \left(1 - \frac{T}{273}\right) \quad (14c)$$

Die Temperatur T wird in Kelvin angegeben.

Es gibt verschiedene Wasser-Gas-Gemische, die gelöste und nicht gelöste Komponenten enthalten. In der Natur treten vorzugsweise Gemische mit CO_2 auf, aber auch Gemische mit Stickstoff, Methan, Schwefelwasserstoff und anderen Gasen werden beobachtet. Die Wasser-Gas-Gemische besitzen von normalen Grundwässern abweichende hydraulische Eigenschaften.

Die Löslichkeit von Gasen im Wasser wird in Gegenwart von gelösten festen Stoffen vermindert.

Tritt ein Fluid mit atmosphärischer Luft in Kontakt, so stellt sich ein Gleichgewicht entsprechend den Partialdrücken der Luftbestandteile im Gasraum und den gelösten Gasen ein. Wässer, die unter hohem Druck mit einem Gas, z. B. mit CO_2 , gesättigt sind, geben dieses Gas so lange ab, bis Gleichgewicht zur Atmosphäre besteht. Dies gilt besonders für Gase wie H_2S und H_2 bzw. CO_2 , deren Partialdrücke in der Atmosphäre nahe Null bzw. sehr niedrig sind.

Als Folge einer Verminderung des freien gelösten CO_2 , beispielsweise durch Kontakt mit der atmosphärischen Luft, oder durch Reduktion des Fluid-Druckes, z. B. bei Thermalwasserförderung aus großer Tiefe, kann in erheblichen Mengen Aragonit und/oder Calcit (CaCO_3) ausgefällt werden. Zur Vermeidung eines Kontaktes mit der atmosphärischen Luft wird das Thermalwasser bei Geothermiebohrungen in einem geschlossenen System gefördert. Zusätzlich wird das geschlossene System mit Drücken in der Größenordnung von ca. 10 bar beaufschlagt. Die Bestimmung der Höhe der erforderlichen Drücke kann theoretisch mit thermodynamischen Programmen und praktisch mit Laborversuchen erfolgen. Beide Verfahren setzen eine genaue Kenntnis der hydrochemischen Zusammensetzung des Fluids voraus.

Der Ermittlung von Gasen und Gasgehalten im Fluid der Lagerstätte kommt höchste Priorität zu. Wichtig ist dabei die Angabe des Bezugs der Maßeinheiten und der Messbedingungen.

➤ **pH-Wert** des Fluids [-]

Als pH-Wert wird der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration bezeichnet ($\text{pH} = -\log[H^+]$). In neutralen Lösungen ist die Konzentration an $[\text{H}^+]$ - und $[\text{OH}^-]$ -Ionen gleich, sie haben den pH-Wert 7,0. Der pH-Wert beeinflusst die Löslichkeit vieler Stoffe und deren Ionenkonzentration im Wasser. Umgekehrt ändern im Wasser gelöste Stoffe häufig den pH-Wert. Daher ist der pH-Wert auch für die Berechnung, ob ein Wasser bezüglich bestimmter Minerale gesättigt oder übersättigt ist, sehr wichtig. Der pH-Wert nimmt i. d. R. mit zunehmender Temperatur ab, da der neutrale Punkt von $\text{pH} = 7,0$ auf kleinere Werte sinkt.

➤ **E_H -Wert (Redoxpotential)** des Fluids [mV], **p_e -Wert** [-]

Die Löslichkeit verschiedener Elemente hängt neben dem pH-Wert auch von ihren im jeweiligen Fluid oder Gestein gegebenen Oxidationsstufen ab. Bei Vorliegen elektrochemischer Potentiale laufen Reduktions-Oxidations(Redox)-Reaktionen ab, bei denen Elektronen übertragen werden. Oxidation kann allgemein als Abgabe von Elektronen und Reduktion als Aufnahme von Elektronen definiert werden.

Als Maß für die relative Aktivität der oxidierten und reduzierten Stoffe in einem System dient das Reduktions-Oxidations(Redox)-Potential; der E_H -Wert ist temperaturabhängig. In einem Fluid, das verschiedene Oxidationsstufen eines Stoffes enthält, wird das Redoxpotential als elektrisches Potential (Spannung) zwischen einer inerten Metallelektrode und einer Standardbezugselektrode, die in die Lösung eingetaucht sind, gemessen.

Die meisten Redoxreaktionen sind pH-Wert abhängig.

Häufig wird anstelle des Redoxpotentials E_H die Größe p_ε als Maß für die Konzentration der Redox-wirksamen Spezies verwendet ($p_\varepsilon = [e^-]$). Der p_ε -Wert ist mit dem E_H -Wert über folgende Beziehung verbunden:

$$p_\varepsilon = \frac{E_H}{2,303 \cdot R \cdot \frac{T}{F}} \quad (15)$$

wobei R die universale Gaskonstante, T die absolute Temperatur und F die FARADAY-Konstante ist.

Für thermodynamische Berechnungen ist die Kenntnis des Redoxzustandes wichtig.

➤ **Elektrische Leitfähigkeit, Salinität** [$S \cdot m^{-1}$], electric conductivity, salinity
Echte und potentielle Elektrolyte dissoziieren in wässriger Lösung. Die dabei entstehenden Ionen machen die Lösung elektrisch leitfähig, wobei die Ionen je nach Dissoziationsgrad und Beweglichkeit unterschiedliche Leitfähigkeiten haben. Die elektrische Leitfähigkeit setzt sich aus den Leitfähigkeitsbeiträgen der einzelnen Kationen und Anionen zusammen. Damit gibt die elektrische Leitfähigkeit einen groben Hinweis auf die Größe des Gesamtlösungsinhaltes und den Abdampfdruck und ist somit ein einfach zu ermittelnder Kontrollparameter. Die elektrische Leitfähigkeit wird vielfach als Log in Bohrungen gemessen, um Zutrittsstellen von Wässern einer anderen Mineralisation zu lokalisieren, und wird hier dann häufig als Salinität bezeichnet. Die elektrische Leitfähigkeit ist eine temperaturabhängige Größe.

➤ **Kationen – Anionen** [mg/l], in hochkonzentrierten Wässern [mg/kg], cations - anions

Der Untersuchungsumfang einer Wasserprobe wird wesentlich vom Untersuchungsziel, vom Stand der wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnisse über die Bedeutung der einzelnen Parameter und von den analytischen Möglichkeiten bestimmt. Gerade für thermodynamische Berechnungen sind häufig die Hauptinhaltsstoffe an Kationen und Anionen allein nicht ausreichend aussagekräftig, so dass auch Spurenstoffe wie Aluminium (Al), Arsen (As), Blei (Pb), Quecksilber (Hg) oder Strontium (Sr) untersucht werden müssen.

Bedeutende Kationen sind: Natrium (Na), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Ammonium (NH_4). Bei den Anionen sind es: Chlorid (Cl), Hydrogenkarbonat (HCO_3), Sulfat (SO_4), Fluorid (F), Bromid (Br), Iodid (I), Nitrit (NO_2), Nitrat (NO_3), und Phosphat (PO_4). Umfangreiche Informationen zur Entnahme und zum Untersuchungsumfang sind in den DVWK REGELN 128 (1992) aufgeführt.

➤ **Undissoziierte Stoffe** [mg/l], in hochkonzentrierten Wässern [mg/kg]
Zu den undissoziierten Stoffen gehören die Kieselsäure (SiO_2) und die Borsäure/Bor (B). Die Kieselsäure kann als geochemisches „Geothermometer“ genutzt werden und gibt dadurch gerade bei Thermalwässern wichtige Hinweise zur Tiefe und Temperatur der „Lagerstätte“. Bor kommt in natürlichen, oberflächennahen Wässern recht selten vor. Eine wichtige Borquelle kommt z. B. in vulkanischen Gasen vor. Bor wird gern als Tracer verwendet, um Auskunft über die Herkunft der Wässer zu erhalten.

➤ **Gesamtkonzentration gelöster Bestandteile** [mg/kg], total dissolved solids (TDS)

Die Gesamtkonzentration gelöster Bestandteile ist die Summe aller gelösten Kationen und Anionen. Die Gesamtkonzentration bei gering mineralisierten Wässern wird häufig auch in Masse pro Volumeneinheit (z.B. mg/l) angegeben.

Tiefenwässer im Oberrheingraben beispielsweise sind hochkonzentrierte Na-Cl-Fluide (100 - 200 g/kg), die in der Regel CO₂-reich sind, unabhängig vom geologischen Schichtaufbau. Im Molassebecken nehmen die Konzentration und der Na-Cl-Gehalt zum Beckentiefsten hin zu. In der Norddeutschen Senke dominieren Formationsfluide des Na-Cl- bzw. des Ca-Na-Cl-Typs, die Gesamtkonzentrationen bis über 300 g/kg erreichen können.

9 Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie: Aquifere

Bei der hydrothermalen Nutzung wird heißes Wasser aus der Tiefe gefördert und über einen Wärmetauscher die Wärme entzogen. Das so abgekühlte Wasser wird meist mit einer zweiten Bohrung i. d. R. in denselben Horizont wieder verpresst. Für diese Nutzungsart kommen Aquifere in Frage, die hohe Durchlässigkeiten aufweisen. Der entscheidende Parameter ist die Ergiebigkeit, d. h. die zu erzielende Förderrate bei einer noch (wirtschaftlich und technisch) zu vertretenden Absenkung (Druckentlastung). Dieser Parameter lässt sich als Produktivitätsindex (vgl. Abschn. 3.7) definieren, der i. d. R. für Bohrungen nicht direkt bestimmt wird und der flächenhaft nur indirekt aus weiteren in Abschnitt 3 beschriebenen Aquifereigenschaften abgeleitet werden kann.

Weitere Hinweise zur hydrothermalen Nutzung aus tiefen Aquiferen sind in der Arbeitshilfe des PK Tiefe Geothermie enthalten (www.infogeo.de/infogeo/dokumente).

10 Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie: Störungen

Im Umgang mit *Störungszonen* als Reservoir besteht derzeit wenig Erfahrung. Ihnen wird ein großes Potenzial zugerechnet, weil sie teilweise tiefreichende Wasserwegsamkeiten darstellen können. Abhängig vom Störungstyp, d. h. dem Entstehungsmechanismus, den rezenten Spannungsverhältnissen, aber auch den geochemischen Prozessen können diese Strukturen sehr gut bis nicht durchlässig sein. Unsicherheiten bezüglich ihrer hydraulischen Eigenschaften einzugrenzen, eröffnet einen Forschungsbereich, der erst die Voraussetzung dafür schaffen muss, diesen Reservoirtyp planbar zu machen. Die Wahrscheinlichkeit, dass Klüfte Fluide führen, wird derzeit bei jungen Strukturen höher eingestuft als bei älteren Strukturen, welche häufiger durch Ausfällungen wieder verheilt sind. Zum jetzigen Zeitpunkt wird jedoch darauf verzichtet, spezielle Parameter zu definieren.

Weitere Hinweise zur hydrothermalen Nutzung im Bereich von Störungen sind in der Arbeitshilfe (www.infogeo.de/infogeo/dokumente) des PK Tiefe Geothermie enthalten.

11 Petrothermale Systeme: Grundgebirge (HDR-Technik)

Hot-Dry-Rock (HDR) Systeme, auch Enhanced Geothermal Systems (EGS) oder Hot-Fractured-Rock (HFR) Systeme genannt, sind Hochtemperatur-Nutzungen mit Temperaturen von mehr als 150–200 °C sowie Tiefen um 5.000 m. Die Gewinnung geothermischer Energie erfolgt unabhängig von wasserführenden Horizonten; Zielhorizont ist meist das kristalline Grundgebirge. Inwieweit dichte Sedimentgesteine für HDR-Verfahren genutzt werden können, ist Gegenstand der Forschung.

In einem ersten Projektstadium wird durch das Einpressen von Wasser in eine Bohrung das natürlich vorhandene Kluftsystem geweitet, die natürliche Permeabilität erhöht und zusätzliche und bessere Wasserwegsamkeiten geschaffen; das Gebirge wird sozusagen „stimuliert“ (Stimulation). Die entstandenen Risse stellen große Wärmetauscherflächen dar. Im späteren Anlagebetrieb wird Oberflächenwasser über Tiefbohrungen zur Aufnahme der Wärme in das künstlich entwickelte Reservoir gepresst und anschließend über eine weitere Bohrung wieder zu Tage gefördert. Auch bei diesem System ist somit Wasser der Wärmeträger. Die Wärmeenergie kann über Förderbohrungen entweder direkt, z. B. für Raumheizung, und/oder zur Stromgeneration genutzt werden (RYBACH 2004).

Weitere Hinweise zur petrothermalen Nutzung mittels HDR-Technik sind in der Arbeitshilfe des PK Tiefe Geothermie enthalten (www.infogeo.de/infogeo/dokumente).

Für die Projektierung von HDR-Anlagen sind folgende Parameter wichtig:

➤ **Verbreitung und Tiefenlage des Grundgebirges (ggf. auch Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeiten von anderen tiefen gering-permeablen Formationen)**

Zur Bewertung von Standorten für die geothermische Energiegewinnung nach dem HDR-Verfahren werden die Verbreitung des kristallinen Grundgebirges und seine Tiefenlage benötigt. Zur Kartierung der Tiefenlage ist man auf Daten aus Tiefbohrungen und seismischen Profilen angewiesen, wobei die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges als Reflexionshorizont oft nicht erkennbar ist. Die Belegpunktdichte für das Grundgebirge durch abgeteufte Bohrungen ist gering und sehr heterogen.

➤ **Gesteinsart**

Für die Bohrtechnik und die spätere Stimulation sind Auskünfte über die Petrographie und die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins wichtig. Granitische Gesteinsverbände reagieren beispielsweise i. A. wesentlich rigider auf eine tektonische Beanspruchung als metamorphe Gesteine. Aussagen zur Standfestigkeit des Gebirges sowie über Verlauf und Art von Störungen sind ebenfalls bedeutsam, da die geplanten Stimulationsstrecken (Openhole) der Injektionsbohrungen und die Zirkulationsbereiche in einem ausreichendem Abstand zu Verwerfungen platziert werden müssen.

➤ **Temperatur, Temperaturprognose**

Ein wichtiger Parameter ist die Temperatur. In großen Tiefen liegen wenige Temperaturdaten vor, so dass man auf eine Extrapolation gemessener Temperaturen aus flacheren Bereichen angewiesen ist. Unter der Annahme eines relativ dichten Ge-

steins (d. h. Ausschluss maßgeblicher Grundwasserbewegungen) kann aus dem konstanten, vertikalen Wärmestrom eine Temperaturextrapolation in die Tiefe, bei der nur die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins berücksichtigt wird, vorgenommen werden. Für größere Tiefen muss zusätzlich die Wärmeproduktionsrate des Gesteins berücksichtigt werden (vgl. Abschn. 1, 2).

➤ **Thermophysikalische Gesteinseigenschaften** (Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeproduktionsrate)

Insbesondere zur Abschätzung des Abstandes zwischen den Injektions- und Förderbohrungen, zur Ermittlung der thermischen Reichweite und zur Prognose der Lebensdauer der Anlage und Alterung des Systems ist die Kenntnis dieser Daten wichtig.

➤ **Hydraulische Eigenschaften** (Permeabilität, Porosität), **Trennflächensystem**

Entscheidend für den Erfolg einer HDR-Anlage sind die hydraulischen Eigenschaften des natürlich vorhandenen Kluftsystems sowie diejenigen der späteren künstlich stimulierten Riss-Systeme. Wesentlichen Einfluss auf den Erfolg der Stimulationsmaßnahme haben Injektionsmenge und -rate, Injektionsdruck bzw. Druckgradient sowie die hydrochemischen Eigenschaften des Injektionsfluids.

Um die für die Energiegewinnung notwendigen Durchflussraten und Temperaturen im Kluftsystem (Trennflächensystem) zu erzielen, muss dieses eine gewisse Mindestgröße aufweisen, d. h. es müssen ausreichend große Durchlässigkeiten durch die Stimulationsmaßnahmen geschaffen werden. Mit zunehmender Durchlässigkeit erniedrigt sich der Fließwiderstand; andererseits birgt eine zu niedrige Impedanz bzw. eine zu hohe Durchlässigkeit die Gefahr hydraulischer Kurzschlüsse und somit unzureichender Wärmeübertragung.

➤ **Formationsdruck**

Für das Abteufen der Bohrung und die später vorgesehenen hydraulischen Maßnahmen im Nutzbereich ist die Kenntnis hydrostatischer und lithostatischer Drücke im Untergrund von wesentlicher Bedeutung.

➤ **Tektonische Spannungen**

Die in-situ Spannung im Gestein (Bohrloch-Elongationen, Bohrlochrandausbrüche, hydraulic fracturing) und der natürlich vorhandene Porendruck (initial formation pore pressure) sollten vor dem Beginn der fortlaufenden Frac-Stimulationen gemessen werden, da dies sowohl für die Beurteilung der erfolgten Stimulation als auch für die Beurteilung der Seismizität bedeutsam ist.

➤ **Übertägiger Raumbedarf, Größe des Wärmetauschers**

Die Landpunkte der Bohrungen müssen sich aller Wahrscheinlichkeit nach am natürlichen Stressfeld orientieren, da sich der Stimulationsbereich, das Reservoir, in diese Richtung ausbilden dürfte. Sollten für das HDR-Projekt ausschließlich Vertikalbohrungen verwendet werden, so ist dies für den oberirdischen Abstand der einzelnen Bohrungen von mehreren 100 m voneinander zu berücksichtigen. Probleme, welche durch eine Expansion der Verrohrung bei Geothermiebohrungen entstehen, sind sicherlich bei Vertikalbohrungen einfacher zu handhaben.

➤ **Eigenschaft des Formations-Fluids**

Das Wasser im kristallinen Grundgebirge ist hochsalinar. Der Gesamtlösungsinhalt liegt bei einigen 10er bis 100er g/l. Die Hauptinhaltsstoffe sind Natrium, Calcium und Chlorid; es ist mit erhöhten Gas-Gehalten zu rechnen (BUCHER & STÖBER 2000). Um den Fällungs- und Lösungsprozessen sowie der Aggressivität des zutage geförderten hoch salinaren, gasreichen Fluids entgegen wirken zu können, müssen die hydrochemischen Eigenschaften des Formations-Fluids für den Bau der übertägigen Anlage bekannt sein (Abschnitt 8).

➤ **Seismische Messungen**

Bereits im Vorfeld sollte damit begonnen werden, alle seismischen Aktivitäten im Umkreis von ca. 10 km um die geplante Geothermie-Anlage mit einer Empfindlichkeit, die eine vollständige Erfassung aller seismischen Ereignisse ab Magnitude 1,0 (Richterskala) garantiert, kontinuierlich zu messen. Die Messungen sind während des Abteufens, der Stimulation und dem Betrieb – zumindest in der Anfangsphase – fortzuführen. Insbesondere zu Beginn der hydraulischen Injektionen und während der Frac-Stimulationen ist eher mit induzierten Beben zu rechnen als im späteren stationären Produktionsbetrieb. Vorab sollten daher bereits Größe und Richtung der Hauptspannungen durch seismologische Herdflächenlösungen bestimmt werden.

12 Petrothermale Systeme: Beliebige Gestein (Tiefe Erdwärmesonde)

Tiefe Erdwärmesonden sind vertikale geschlossene Wärmetauscher, installiert in Bohrungen von mehr als 400 m Tiefe. In diesem Wärmetauscher zirkuliert ein Wärmeträgermedium; in der Regel ist dieses Fluid in einem koaxialen Rohr eingeschlossen. Im Ringraum der Sonde fließt das kalte Wärmeträgerfluid nach unten, um anschließend in der dünneren eingehängten Steigleitung erwärmt wieder aufzusteigen.

In der Arbeitshilfe des PK Tiefe Geothermie (www.infogeo.de/infogeo/dokumente) sind weitere Hinweise zur petrothermalen Nutzung mittels Tiefer Erdwärmesonden enthalten.

Tiefe Erdwärmesonden werden zurzeit ausschließlich zur Wärmeabgewinnung eingesetzt. Überlegungen zum Einsatz von Erdwärmesonden zur Gewinnung von Strom führten bisher zu keinen konkreten Ergebnissen. Vielmehr finden sie ihren Platz im Rahmen von Projekten, in denen auf eine vom Standort unabhängige Wärmeversorgung mittleren Temperaturniveaus (bis ca. 60 °C Vorlauftemperatur) Wert gelegt wird. Tiefe Erdwärmesonden bieten die Möglichkeit, die gewonnene Erdwärme in einer so genannten Kaskadennutzung (Nutzung unterschiedlicher Temperaturniveaus) der direkten Verwendung zuzuführen. Da sich zwischen dem Wärmeträgermedium und dem umgebenden Gestein kein direkter Kontakt ergibt, sind Tiefe Erdwärmesonden, abgesehen von eventuellen bergrechtlichen, wasserrechtlichen oder bohrtechnischen Restriktionen, nahezu überall einsetzbar. Ihr großer Vorteil besteht darin, dass es sich um ein geschlossenes System handelt, welches äußerst wartungsarm ist und dessen Effizienz im wesentlichen nur von den Parametern Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des erbohrten Gesteins sowie der Sondenkonfiguration bestimmt wird. Hydro(geo)logische Fragen spielen so gut wie keine

Rolle; allerdings kann insbesondere eine im tieferen Bereich der Sonde angetroffene starke Wasserführung die Effizienz der Sonde deutlich vergrößern.

Die Leistung von Erdwärmesonden beträgt i. d. R. wenige hundert kW und ist somit wesentlich geringer als bei offenen Systemen. Dies liegt daran, dass die Wärmeübertragungsfläche mit dem Gebirge kleiner ist, da sie nur der Mantelfläche der Bohrung entspricht. Der Einsatz zwischengeschalteter Wärmepumpentechnik kann in vielen Bereichen das Potential einer Tiefensonde erhöhen. Als Wärmeträgermedium wird bei diesen Systemen eine Flüssigkeit mit einem niedrigen Siedepunkt verwendet. Diese so genannten Heatpipes erreichen eine höhere Entzugsleistung als konventionelle Sonden, da auf ihrer gesamten Länge das Arbeitsmittel die Verdampfungstemperatur erreichen kann.

Im Gegensatz zu den offenen Systemen ist ein Fündigkeitsrisiko bei geschlossenen Tiefensonden nicht gegeben. Den Planern und Investoren bleibt jedoch die Frage der kalkulierbaren Wirtschaftlichkeit beziehungsweise des Rückflusses getätigter Investitionen. Zurzeit existieren mehrere Programme zur rechnergestützten Simulation des Langzeitverhaltens Tiefer Erdwärmesonden. Durch die Kopplung dieser Programme mit einem geologischen Modell des Projektstandortes werden die Aussagen der Simulationen deutlich verbessert.

Wegen der meist erforderlichen großen Bohrtiefen stellen die Bohrkosten und das Bohrrisiko einen wesentlichen Kostenfaktor für Tiefe Erdwärmesonden dar. Auch wenn die Effizienz Tiefer Erdwärmesonden weniger von den geologischen Untergrundverhältnissen abhängt als es beispielsweise bei hydrothermalen Systemen der Fall ist, ist allein schon zur Planung und Risikominimierung der Bohrungen eine möglichst exakte Prädiktion der geologischen Verhältnisse notwendig. Tiefe Erdwärmesonden bieten sich insbesondere dort an, wo eine nicht genutzte Tiefbohrung bereits vorhanden ist, z. B. als Nachnutzung nicht verwahrter KW-Bohrungen oder aufgegebener Geothermiebohrungen.

Für die Planung einer Tiefensonde sind Kenntnisse über folgende Parameter notwendig:

- Zieltiefe
- Teufenabhängige Untergrundtemperatur
- Lithologische Ausbildung, Mächtigkeit der Gesteinseinheiten
- Wasserführung
- Strukturgeologie, insbesondere Störungen
- Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine
- Wärmekapazitäten der Gesteine

13 Überblick über die für die verschiedenen geothermischen Nutzungssysteme relevanten natürlichen Parameter

	Hydrothermale Nutzung	HDR	Erdwärmesonde	Abschnitt-Nr.
Temperatur	1	1	1	1.2
Wärmestromdichte	2	2	2	1.3
hydraulische Parameter				
Permeabilität / Durchlässigkeit	1	2	3	3.3
Transmissivität / Transmissibilität	1	3	3	3.4
Porosität	1	3	3	3.5
Speicherkoeffizient	2	3	4	3.6
Produktivitätsindex	1	3	4	3.7
hydraulische Tests	1	1	4	4
thermophysikalische Gesteinseigenschaften				
Wärmeleitfähigkeit	3	2	1	2.1
Gesteinsdichte	3	2	1	2.2
Wärmekapazität	3	2	1	2.3
Fluideigenschaften				
Dichte, Viskosität, Kompressibilität.	1	2	4	8
pH, E _H , Temperatur	1	1	3	8
Gase, Gasanalyse	1	1	2	8
Gesamtkonzentration (TDS)	1	1	3	8
Anionen - Kationen (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO ₃ , SO ₄ , ...)	1	1	3	8
Undissoziierte Stoffe	1	1	4	8
Problemstoffe (z. B. As, radioaktive Inhaltsstoffe)	2	2	3	
geologische Eigenschaften				
Störungen, Spannungsfeld	2	1	3	10, 11
Petrographie / Gesteinsart	1	1	2	11
Geometrie des Aquifers / Wärmeaustauschfläche	1	1	4	7, 11

- 1 – sehr wichtig
- 2 – relevant
- 3 – geringe Bedeutung
- 4 – keine Bedeutung

14 Literaturliste, Regelwerke, Quellen, Links

14.1 *Verwendete Literatur*

- BUCHER, K. & STÖBER, I. (2000): The composition of groundwater in the continental crystalline crust. – In: STÖBER, I. & BUCHER, K. (eds.) (2000): Hydrogeology in crystalline rocks. – KLUWER academic Publishers, p.141-176.
- COOPER, H. H., BREDEHOEFT, J. D. & PAPADOPULOS, I. S. (1967): Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. – *Water Resources Research* **3**, 1.
- COOPER, H. H. & JACOB, C. E. (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. – *Trans. Am. Geoph. Union* **27**.
- FRICKE, S. & SCHÖN, J. (1999): *Praktische Bohrlochgeophysik*. – Enke Verlag, 256 S., Stuttgart.
- GRINGARTEN, A. C., BOURDET, D. P., LANDEL, P. A. & KNIAZEFF, V. J. (1979): A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis. – *Soc. Petroleum Eng.* **8205**, Dallas, Tex.
- HORNER, D. R. (1951): Pressure build-up in wells. – *Proc. 3rd World Petroleum Congress, Section II*, Leiden.
- HVORSLEV, M. J. (1951): Time lag and soil-permeability in groundwater observations. – *U.S. Corps Eng., Waterways Experimental Stn., Bull. No. 36*, Vicksburg, Miss.
- JACOB, C. E. & LOHMAN, S. W. (1952): Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. – *Trans. Am. Geoph. Union* **33**.
- KRUSEMAN, G. P. & DE RIDDER, N. A. (1991): *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. – ILRI Publication 47, 2nd Edition, 377 S. Wageningen.
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE & NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1997): *Altlastenhandbuch des Landes Niedersachsen. Wissenschaftlich-technische Grundlagen der Erkundung*. – Springer Verlag, 557 S.
- PAPADOPULOS, I. S., BREDEHOEFT, J. D. & COOPER, H. H. (1973): On the analysis of slug test data. – *Water Resources Research* **9**, 4.
- PK TIEFE GEOTHERMIE (2007): *Geothermische Arbeitshilfe der Staatlich Geologischen Dienste* (<http://www.infogeo.de/infogeo/dokumente>).
- RAMEY, H. J., AGARWAL, R. G. & MARTIN, J. (1975): Analysis of slug test or dst flow period data. – *J. Can. Petroleum Technol.* **14**, 3, Montreal.

RYBACH L. (2004): EGS – State of the Art. – Tagungsband der 15. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie, Basel.

STOBER I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. – Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 42, 204 S., Hannover.

THEIS, C. V. (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. – Trans. Am. Geoph. Union **16**.

14.2 Allgemeine weiterführende Literatur

BATU, V. (1998): Aquifer Hydraulics. – A comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis. – Wiley & Sons, 728 S., New York.

HERTH, W. & ARNDTS, E. (1995): Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung. – 3. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 358 S., Berlin.

LANGGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. – Springer-Verlag, 1005 S., Berlin Heidelberg New York.

ŞEN, Z. (1995): Applied Hydrogeology for Scientists and Engineers. – Lewis Publishers, 444 S., Boca Raton New York London Tokyo.

SINGHAL, B. B. S. & GUPTA, R. P. (1999): Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. – Kluwer Academic Publishers, 400 S., Dordrecht Boston London.

14.3 Verwendete Regelwerke

DIN 4049: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. – Deutsches Institut für Normung e.V., 79 S., Berlin.

DVWK REGELN 128 (1992): Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. – DVWK Regeln zur Wasserwirtschaft, Verlag Paul Parey, 36 S., Hamburg & Berlin.

DVGW REGELWERK TECHNISCHE REGEL ARBEITSBLATT W 109: Planung, Durchführung und Auswertung von Markierungsversuche bei der Wassergewinnung. – Dezember 2005, 22 S., Bonn.

DVGW REGELWERK TECHNISCHE REGEL ARBEITSBLATT W 110: Geophysikalische Untersuchungen in Bohrlöchern und Brunnen zur Erschließung von Grundwasser. – Juni 1990, 50 S., Bonn.

DVGW REGELWERK TECHNISCHE REGEL ARBEITSBLATT W 111: Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung. – März 1997, 37 S., Bonn.

14.4 Quellenhinweise für Abbildungen

Abb. 1–7: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE & NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (1997)

Abb. 9: Lippmann & Rauen GbR