

Geohydraulische Erkundung im Festgestein am Beispiel der Neckarschleife Besigheim

Dipl.-Ing. Charlotte Laursen, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik
 Dr. rer. nat. Uwe Hekel, HPC AG, Rottenburg, Geschäftsbereich Geohydraulik

1 Einleitung

Um überlangen Großmotorschiffen mit 135 m Länge die Befahrung des Neckars zu ermöglichen, ist es geplant 27 Schleusen teils landseitig, teils wasserseitig, teils nach Oberwasser und teils nach Unterwasser zu verlängern. Im Rahmen dieser Maßnahme sollen die Schleusenammern instand gesetzt werden, um eine einem Neubau ähnliche Nutzungsdauer zu erreichen. Die Instandsetzung beinhaltet u. a. auch die Herstellung auftriebssicherer Sohlen.

Sowohl für den Entwurf der Schleusenverlängerung als auch für die Wahl und Bemessung des Baugrubensystems sind unterschiedliche Randbedingungen maßgebend, darunter die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse. Im Rahmen der Erstellung des Baugrundgutachtens wurde der Baugrund durch eine Vielzahl von Aufschlussbohrungen erschlossen, die zum Teil zur Erkundung der Grundwasserverhältnisse zu Grundwassermessstellen ausgebaut wurden. Zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit der anstehenden Festgesteine wurden verschiedene In-situ-Verfahren eingesetzt, die nachfolgend hinsichtlich ihrer Versuchsdurchführung und Anwendungsgrenzen vorgestellt werden.

2 Situation

Die Schleuse Besigheim liegt bei Neckar-km 136,23 am Ende des Schleusenkanals, der im Innern der Neckarschleife zum Unterwasser führt (Bild 1).



Bild 1: Luftbildaufnahme der Neckarschleife mit der Staustufe Besigheim (Quelle: WSA Stuttgart)

Der Untersuchungsbereich liegt im Gebiet der Besigheim-Lauffener Neckarschlingen. Geologisch ist dieser Bereich geprägt von den Gesteinen des Oberen Muschelkalkes (Hauptmuschelkalk) und des Mittleren Muschelkalkes mit einer Gesamtmächtigkeit von ca. 90 m. Durch die Erosion von Enz und Neckar sind die Gesteine des Oberen Muschelkalkes weitestgehend oder gänzlich ausgeräumt, so dass an der

Talsohle nur noch Gesteine des Unteren Hauptmuschelkalke oder des Mittleren Muschelkalke anstehen.

Der Untere Hauptmuschelkalk, der sogenannte Trochitenkalk, besteht überwiegend aus Kalksteinen mit Tonmergel- und Mergelsteinzwischenlagen. Der Mittlere Muschelkalk ist in drei Formationen unterteilt. Die „Obere Dolomittregion“ besteht überwiegend aus Dolomitsteinen. Die darunter folgende „Anhydrit-Region“, die mächtigste Formation des Mittleren Muschelkalke, wird aus Anhydrit- und Steinsalzlagen aufgebaut, bereichsweise sind Ton- und Dolomitsteinen zwischen geschaltet. Der Anhydrit ist meist in Gips umgewandelt, in Tälern sind Salz- und Gipssteine ausgeblutet, so dass nur noch Restmächtigkeiten an Auslaugungsresten von einigen 10er Metern vorhanden sind. Die Basis wird von der „Unteren Dolomittregion“ gebildet, die aus Kalk- und Dolomitmergelsteinen besteht. Die Auslaugung im Mittleren Muschelkalk wirkt sich auch im oberen Muschelkalk aus, dessen Lagerung durch Nachstürzen und Nachsacken gestört wird. Diese Auslaugungstechnik tritt besonders an den Taflanken in Erscheinung. Auch kommt es zur Ablösung von Felspartien entlang von Klüften, wie z. B. in den bekannten Felsengärten von Besigheim (Bild 1, Prallhang am oberen Bildrand).

Im Untersuchungsgebiet ist aufgrund der aus der tektonischen Situation resultierenden Störungen mit deutlichen gegeneinander versetzten Gesteinseinheiten zu rechnen. Bevorzugte Wasserwege, die ebenfalls aus den tektonischen Bewegungen resultieren, führen und führen immer noch zu Auslaugungen, die ihrerseits zusätzliche Gesteinsbewegungen zur Folge haben.

Die geologischen Gegebenheiten bedingen einen sehr heterogenen Baugrundaufbau, der eine eindeutige Festlegung des Grundwassermessstellenausbaues im Vorfeld der Bohrkampagne (Bild 2) nicht gestattet. Deshalb wurden nach Aufnahme der Bohrkern vor Ort die Versuchsstrecken für die hydrogeologischen Bohrlochversuche ausgewählt. Der Ausbau der Grundwassermessstellen hinsichtlich Tiefenlage und Länge der Filterstrecke wurde nach Vorliegen der Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit festgelegt.



Bild 2: Schleuse Besigheim, Bohrarbeiten vom Ponton

3 Hydraulische Bohrlochversuche

3.1 Allgemeines

In der hydrogeologischen Erkundung ist die Gebirgsdurchlässigkeit eine wichtige Kenngröße. Als Transmissivität T und daraus abgeleitetem Durchlässigkeitsbeiwert k ist sie maßgeblich für grundwasserhydraulische Berechnungen, insbesondere zur Bemessung von Wasserhaltungen bei Baumaßnahmen im Grundwasser. Im Gegensatz zur Gesteinsdurchlässigkeit, die anhand von Proben im Labor bestimmt wird, erfolgt die Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit mit Hilfe von Bohrlochversuchen im natürlichen Gesteinsverband. In Festgesteinen spiegelt sie damit die Durchlässigkeit von Gestein (Matrix) und Klüften wieder.

Traditionell wurden (und werden oft leider immer noch) Durchlässigkeitsbeiwerte aus WD-Versuchen mit einer stark vereinfachenden stationären Umrechnung der Raten-Druck-Relation ermittelt. Die Raten-Druck-Relation ist aber neben der Gebirgsdurchlässigkeit noch von weiteren wesentlichen Einflussfaktoren abhängig, u. a. vom Kolmatierungsgrad des Bohrlochs, von Leckagen und von der Verpressdauer. WD-Versuche nach DIN EN ISO 22282-3 (2008) oder DGEG-Empfehlung Nr. 9 (1984) sollten daher nur zur groben Überprüfung der Dichtigkeit des Trennflächengefüges sowie zur Überprüfung von Verpressungen und dem Verhalten des Gebirges gegenüber hydraulischem Druck eingesetzt werden. Folgerichtig enthält DIN EN ISO 22282-3 (2008) auch den Hinweis, dass die Bestimmung exakter Durchlässigkeitsbeiwerte mit transienten, d.h. instationären Verfahren erfolgen soll.

Mit instationären Auswerteverfahren können wesentliche Störeinflüsse erkannt, eliminiert und somit exakte Werte für die Gebirgsdurchlässigkeit ermittelt werden. Dies gelingt durch eine Betrachtung der zeitlichen Druckänderung statt - wie bei den stationären Verfahren - durch die Betrachtung einer singulären Raten-Druck-Relation. Um die benötigten Informationen aus der zeitlichen Druckänderung beziehen zu können, ist beim Bohrlochversuch eine definierte Anregung erforderlich. Dies ist entweder eine konstante Rate oder ein definierter Druckimpuls. Die eingesetzte Packerausrüstung wie auch die Versuchsdauer sind dabei weitgehend gleich wie beim klassischen WD-Test, die Versuchsdurchführung ist jedoch an die Gewinnung definierter zeitlicher Druckänderungen angepasst.

Die Versuchsart richtet sich nach der erwarteten Größenordnung der Gebirgsdurchlässigkeit, die aus Beobachtungen während des Bohrens und der Aufnahme der Bohrkerns abgeschätzt wird. Dem entsprechend werden Injektionsversuche mit konstanter Rate (KRI), Slug-Tests (SLUG), Drill-Stem-Tests (DST) und Pulse-Tests (Pulse) ausgeführt.

Im offenen Bohrloch kommen dabei zur abschnittswisen Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit Einzel- oder Doppelpackersysteme zur Anwendung (Bild 3, Bild 7). Das Packersystem wird an einem Testgestänge in das Bohrloch eingebaut. Für den dichten Abschluss der Teststrecke werden die Packer hydraulisch oder mit Druckluft aufgeblasen. Mit einem Drucksensor wird der Druckverlauf in der Teststrecke kontinuierlich gemessen. Mit weiteren Drucksensoren im Bohrloch außerhalb der Teststrecke können Undichtigkeiten der Packer bzw. Umläufigkeiten während des Versuchs erkannt werden. Nach dem Setzen der Packer wird die Packerdichtigkeit durch einen Eingießversuch in das Bohrloch überprüft. Während der Bohrlochwasserstand entsprechend ansteigt, sollte der Druck in der Packerstrecke unbeeinflusst bleiben. Um Störeffekte zu vermeiden, sollte mit dem eigentlichen Versuch erst dann begonnen, wenn sich in der Teststrecke der Ruhedruck eingestellt hat.

3.2 Injektionsversuche

In stark durchlässigem bis durchlässigem Untergrund ($k = 10^{-2}$ bis 10^{-6} m/s) werden Injektionsversuche mit konstanter Rate (KRI) eingesetzt. Beim KRI wird Wasser mit konstanter Rate in die Teststrecke injiziert (Bild 3). Die Rate wird so bemessen, dass sie einerseits einen gut messbaren Druckverlauf generiert, andererseits aber nicht zu hoch ist, um das Aufreißen von Trennflächen zu vermeiden. I. d. R. werden Differenzdrücke von 1-10 m WS (0,1 bis 1 bar) angestrebt. Nach der Injektionsphase wird der Druckabbau in der Teststrecke gemessen. Beide Versuchsphasen werden so lange gemessen, bis entweder eine Druckkonstanz erreicht wird oder eine sichere instationäre Bestimmung der hydraulischen Kenngrößen möglich ist. Hierzu ist eine Feldauswertung erforderlich.

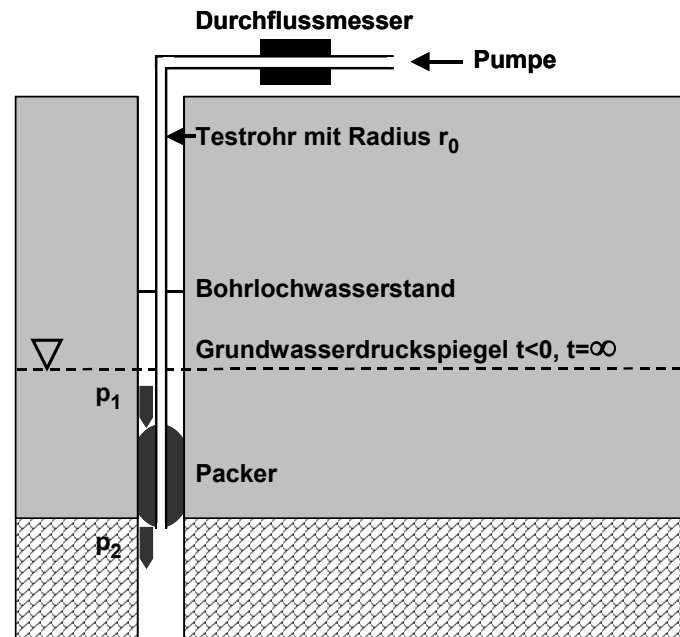


Bild 3: Bohrloch-Testequipment für Injektionsversuche mit konstanter Rate (KRI) am Beispiel einer Einzelpackeranordnung. p_1 und p_2 sind die Wasserdrücke, die mit Drucksensoren über bzw. unter dem Packer gemessen werden, die Rate wird i.d.R. mittels induktivem Durchflussmesser gemessen

Die instationäre Auswertung der Injektions- und Druckabbauphase erfolgt nach dem Verfahren von Gringarten et al. (1979). Hierbei können innere Randbedingungen (bohrlochspezifische Störgrößen) und äußere Randbedingungen (hydraulische Ränder wie Stau- oder Anreicherungsgrenzen) erkannt und berücksichtigt werden. Für die einfachere Handhabung existieren Typkurvenvorlagen mit erster mathematischer Ableitung nach Bourdet et al. (1983). Die Bestimmung der Transmissivität erfolgt dabei nach

$$T = \frac{s_D \cdot Q}{2\pi \cdot s}$$

mit den Deckungspunkten für s_D und s . Die Anwendung ist in Bild 4 dargestellt, für weitergehende Informationen wird auf Odenwald et al. (2009) verwiesen.

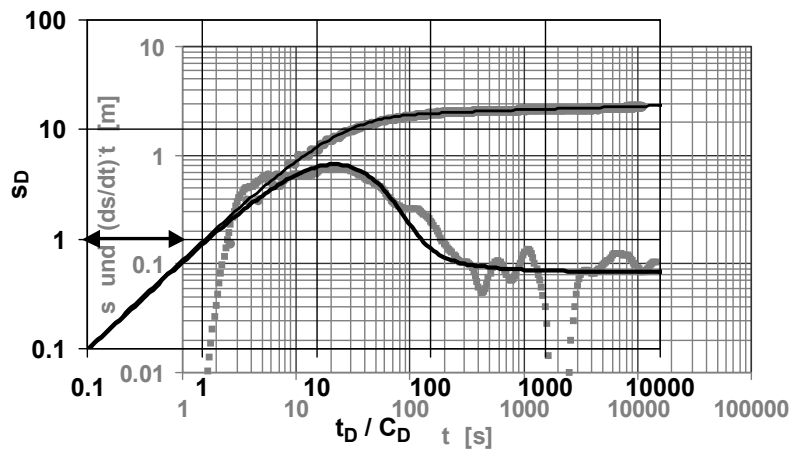
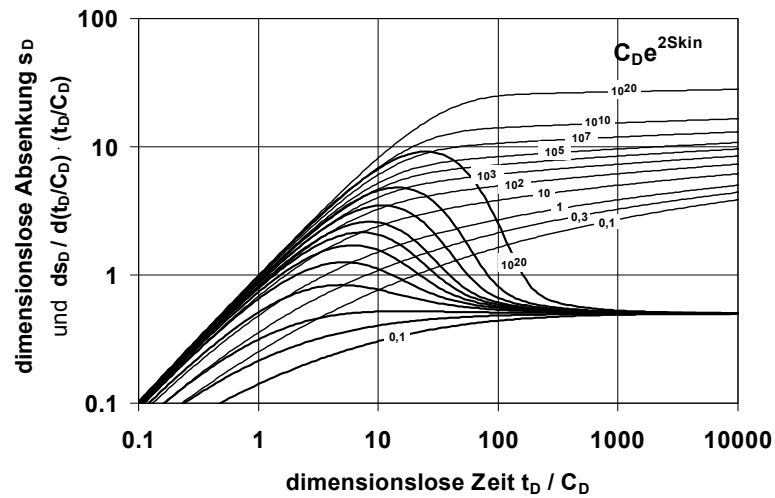


Bild 4: Typkurvenvorlage mit Ableitungen nach Gringarten und Bourdet (links) und Handhabung der Typkurvenvorlage nach Gringarten und Bourdet bei der Auswertung von Injektionsversuchen (KRI). Die doppellogarithmische Auftragung des Druckanstiegs und ihre erste mathematische Ableitung werden mit der am besten passenden Typkurve und deren Ableitung zur Deckung gebracht. Zur einfachen Ermittlung der Transmissivität T werden Deckungspunkte für s (Druck) und s_D (aus der zur Deckung gebrachten Typkurvenvorlage) abgelesen (hier z. B. $s=0,2$ und $s_D=1$) und in die Formel für T eingesetzt (rechts)

Bild 5 zeigt ein Anwendungsbeispiel für einen Injektionsversuch (KRI) aus der Bohrung BKF20 im Bohrlochabschnitt 14,3-16,0 m. Von 14:20 Uhr bis ca. 15:20 Uhr wurde ein Zufluss mit einer Rate von 0,05 l/s in die abgepackte Teststrecke injiziert. Der Druckverlauf in der Teststrecke wurde in der Injektionsphase und in der Druckabbauphase kontinuierlich gemessen. Zur Kontrolle des Versuchsverlaufs wurden außerdem der Wasserstand im Bohrloch, die Injektionsrate und der Packerdruck gemessen und aufgezeichnet.

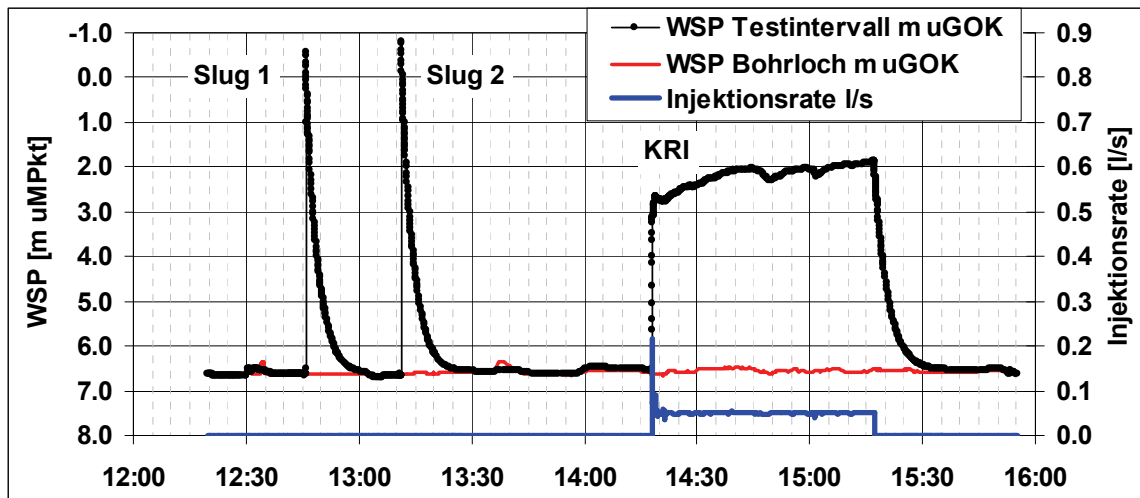


Bild 5: Schleuse Besigheim, Bohrung BKF20, Bohrlochabschnitt 14,3-16,0 m (Einzelpacker gegen Bohrlochsohle): Slug-Tests und Injektionstest (KRI)

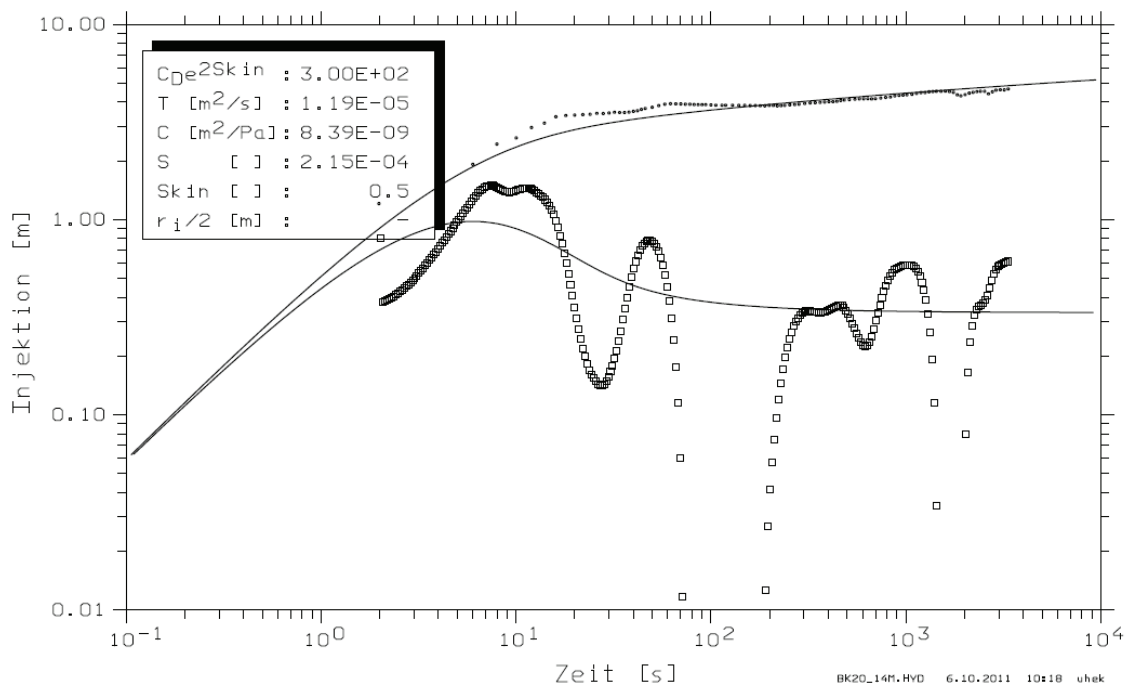


Bild 6: Bestimmung der Transmissivität T für die Injektionsphase des KRI in BKF20, Bohrlochabschnitt 14,3-16,0 m mittels Typkurvendeckungsverfahren nach Gringarten und Bourdet

Bild 6 zeigt die doppellogarithmische Auftragung des Druckverlaufs aus der Injektionsphase und die Anpassung mit der Typkurvenvorlage. Aus dem ermittelten Transmissivitätswert von $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ kann mit Division durch die Teststreckenlänge von 1,7 m der (mittlere) Durchlässigkeitsbeiwert von $7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ für die Teststrecke gewonnen werden.

3.2 Spezielle Bohrlochversuche (geschlossene Systeme)

Zur exakten Bestimmung geringer Gebirgsdurchlässigkeiten werden Bohrlochversuche mit geschlossenem System gem. DIN EN ISO 22282-6 (2008) durchgeführt. Dies bedeutet, dass der zu prüfende Bohrlochabschnitt mittels Packersystem abgeschlossen wird (vgl. Bild 7). Hierbei kann es sich um eine Doppelpacker- oder eine Einzelpackeranordnung handeln, mit der der Bohrlochabschnitt zwischen Packer und Bohrlochsohle getestet wird.

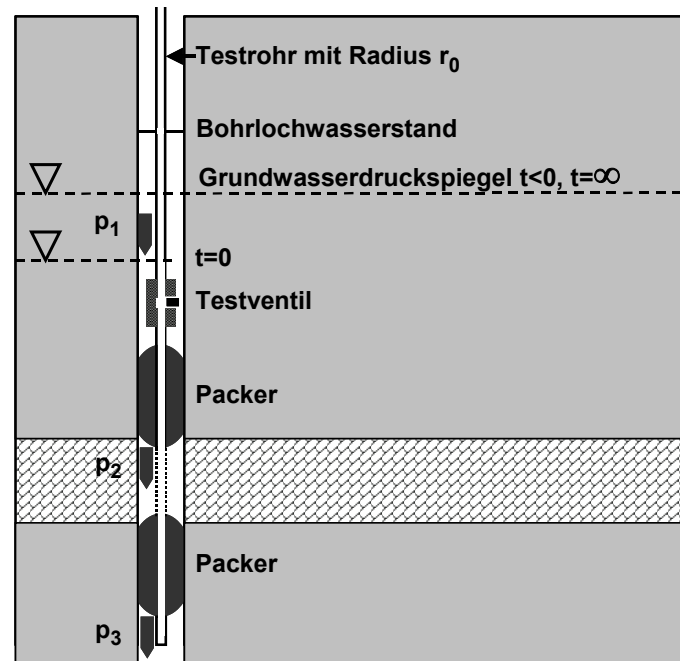


Bild 7: Bohrloch-Testequipment für Slug-, Drill-Stem- und Pulse-Tests am Beispiel einer Doppelpackeranordnung. p_1 , p_2 und p_3 sind die Wasserdrücke, die mit Drucksensoren über, zwischen bzw. unter den Packern gemessen werden (aus Odenwald et al. (2009))

Für Slug-, Pulse- und Drill-Stem-Tests wird ein Testventil benötigt, mit dem der Durchgang zwischen dem Testrohr und der Packerstrecke geöffnet und geschlossen werden kann (Bild 7). Bei geschlossenem Ventil wird der Wasserspiegel im Testrohr um einige Meter abgesenkt, z. B. durch Abpumpen oder Ausschöpfen von Wasser (alternativ kann auch eine Erhöhung des Testrohrwasserspiegels erfolgen). Wird das Testventil anschließend geöffnet, strömt Wasser aus dem abgepackerten Gebirgsabschnitt in das Testrohr nach, bis der Testrohrwasserspiegel den Ruhedruck des Aquifers erreicht hat (Fließphase). Je nach Schaltsequenz des Testventils und daraus resultierenden Fließ- und Schließphasen unterscheidet man die drei Testarten Slug, DST und Pulse:

Slug-Test

Slug-Tests kommen in durchlässigem bis schwach durchlässigem Untergrund ($k = 10^{-4}$ bis 10^{-8} m/s) zur Anwendung. Der Slug-Test besteht nur aus einer Fließphase. Das Testventil bleibt geöffnet, bis durch das nachströmende Wasser der Ruhedruck des Gebirgsabschnitts erreicht ist. Die Auswertung erfolgt mit einem instationären Lösungsverfahren, wie z. B. dem Typkurvenverfahren nach Cooper et al. (1967) (Bild 8)

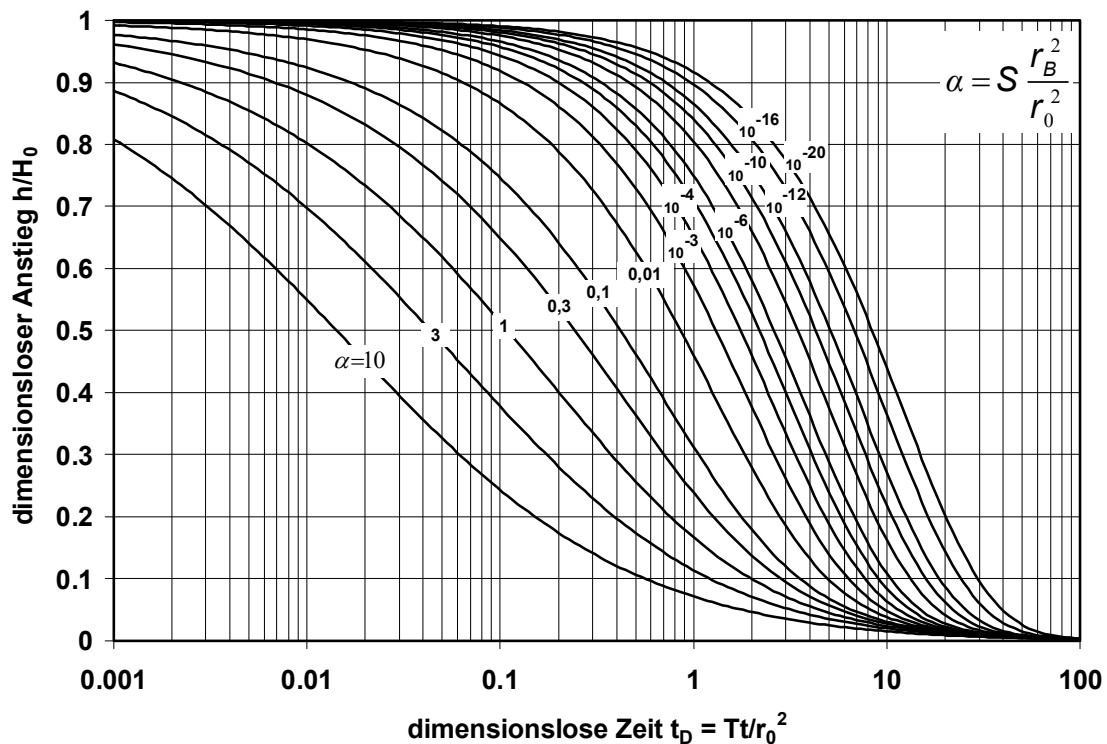


Bild 8: Typkurven zur Auswertung von Slug-Tests nach Cooper et al. (1967) (aus Odenwald et al. (2009))

Die Daten der Wasserspiegelerholung werden als Quotient der Restabsenkung (Aufhöhung) h zum Zeitpunkt t und der maximalen Absenkung (Aufhöhung) H_0 bei $t=0$ in linearem Maßstab auf der y-Achse gegen die Zeit auf der x-Achse in logarithmischem Maßstab aufgetragen.

Die in gleichem Maßstab vorliegende Typkurvenschar (Bild 8) wird in x-Richtung auf die Datenkurve geschoben, bis eine Typkurve mit der Datenkurve bestmöglich übereinstimmt. Aus einem beliebigen Deckungspunkte der x-Achsen t und t_D bestimmt sich die Transmissivität T nach:

$$T = \frac{t_D r_0^2}{t}$$

bzw. hieraus nach Division durch die Mächtigkeit M der Teststrecke der Durchlässigkeitsbeiwert k als Mittelwert für die Teststrecke.

Um eine sicherere Auswahl der Typkurve zu ermöglichen, wird in der Praxis mit der ersten mathematischen Ableitung gearbeitet und bei der Anpassung die Ableitung der Typkurve mit der Ableitung der Datenkurve zur Deckung gebracht.

Bild 9 zeigt diese Typkurvenauswertung am Beispiel des in Kap. 3.2 (Bild 5) dargestellten Slug-Tests in der Bohrung BKF20, Schleuse Besigheim, Bohrlochabschnitt 14,3-16,0 m. Aus dem ermittelten T -Wert von $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ kann mit Division durch die Länge der Teststrecke (1,7 m) ein Durchlässigkeitsbeiwert von $7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ berechnet werden.

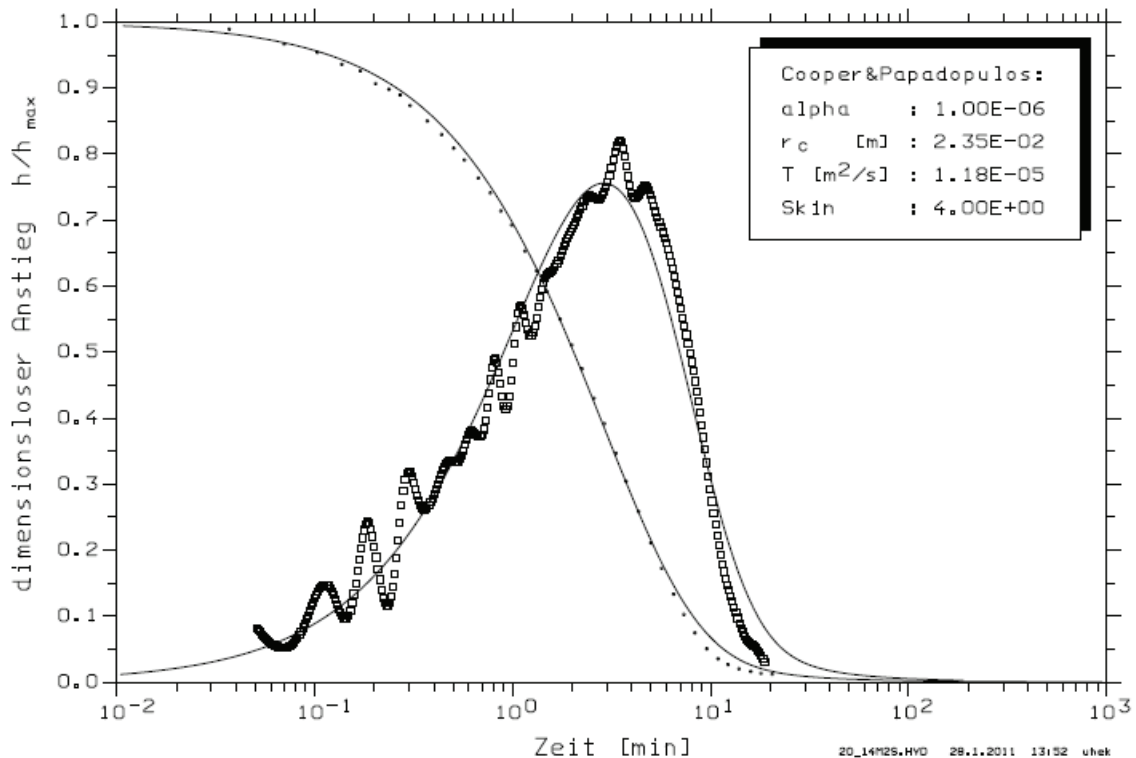


Bild 9: Normierte Auftragung der Daten des 2. Slugtests in der Bohrung BKF20, Bohrlochabschnitt 14,3-16,0 m (vgl. Bild 5) und Anpassung mit der Typkurvenvorlage nach Cooper et al. (1967)

Pulse-Test

Mit Pulse-Tests können Durchlässigkeitsbeiwerte in sehr schwach durchlässigem Untergrund ($k < 10^{-8}$ m/s) bestimmt werden. Beim Pulse-Test wird das Testventil unmittelbar nach Einstellung der maximalen Druckänderung im Testabschnitt wieder geschlossen. Die Messung erfolgt bis zum Erreichen des Ruhe-drucks im Testintervall. Der Pulse-Test besteht somit nur aus einer Schließphase. Bei dieser Art der Versuchsdurchführung muss kein Volumenausgleich im Testrohr, sondern lediglich ein Druckausgleich im abgeschlossenen Testabschnitt erfolgen. Es werden die gleichen Auswerteverfahren wie beim Slug-Test angewendet, wobei der beim Pulsetest nicht vorhandene Testrohrradius durch einen Ausdruck für die Systemkompressibilität ersetzt wird.

Bild 10 zeigt ein Beispiel einer Sequenz mit Pulse und DST in der Bohrung BKF05, Bohrlochabschnitt 20,8-22,7 m. Nach dem Setzen des Packers um 12:30 Uhr wurde um 12:56 Uhr das Testventil für wenige Sekunden geöffnet, um den aus der Wassersäule im Testrohr resultierenden Druckimpuls als Pulse-Test in die Teststrecke zu übertragen. Der Druckabbau wurde bis 13:25 Uhr gemessen. Danach wurde das Testventil für eine 5-minütige Fließphase eines DST nochmals geöffnet. Die Auswertung des Pulse-Test ist in Bild 11 dargestellt. Die mit dem Typkurvenverfahren nach Cooper et al. (1967) ermittelte Transmissivität liegt bei $6 \cdot 10^{-9}$ m²/s, woraus bei einer Teststreckenlänge von 0,9 m ein k-Wert von $7 \cdot 10^{-9}$ m/s resultiert.

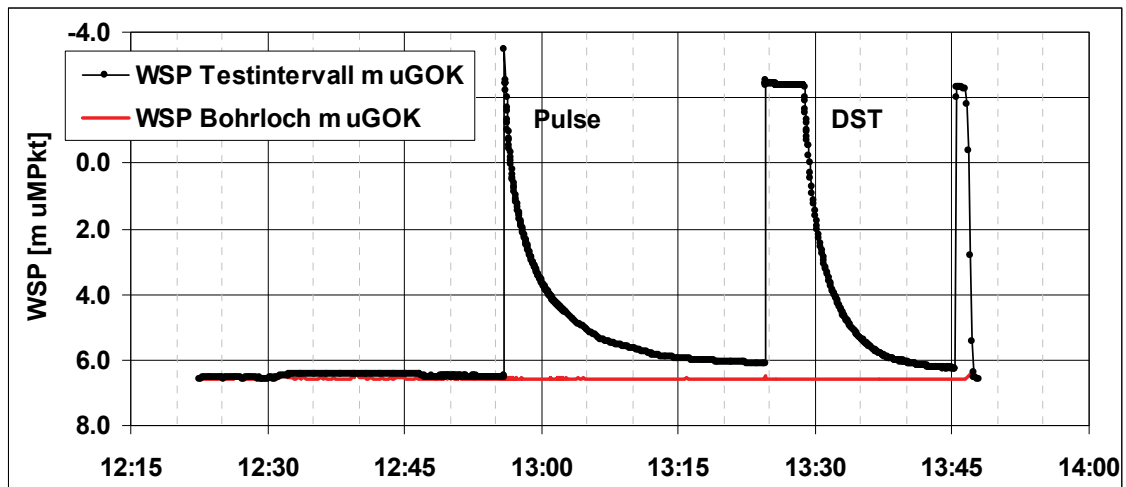


Bild 10: Schleuse Besigheim, Bohrung BKF05, Bohrlochabschnitt 20,8-22,7 m (Einzelpacker gegen Bohrlochsohle): Pulse- und Drill-Stem-Test (DST)

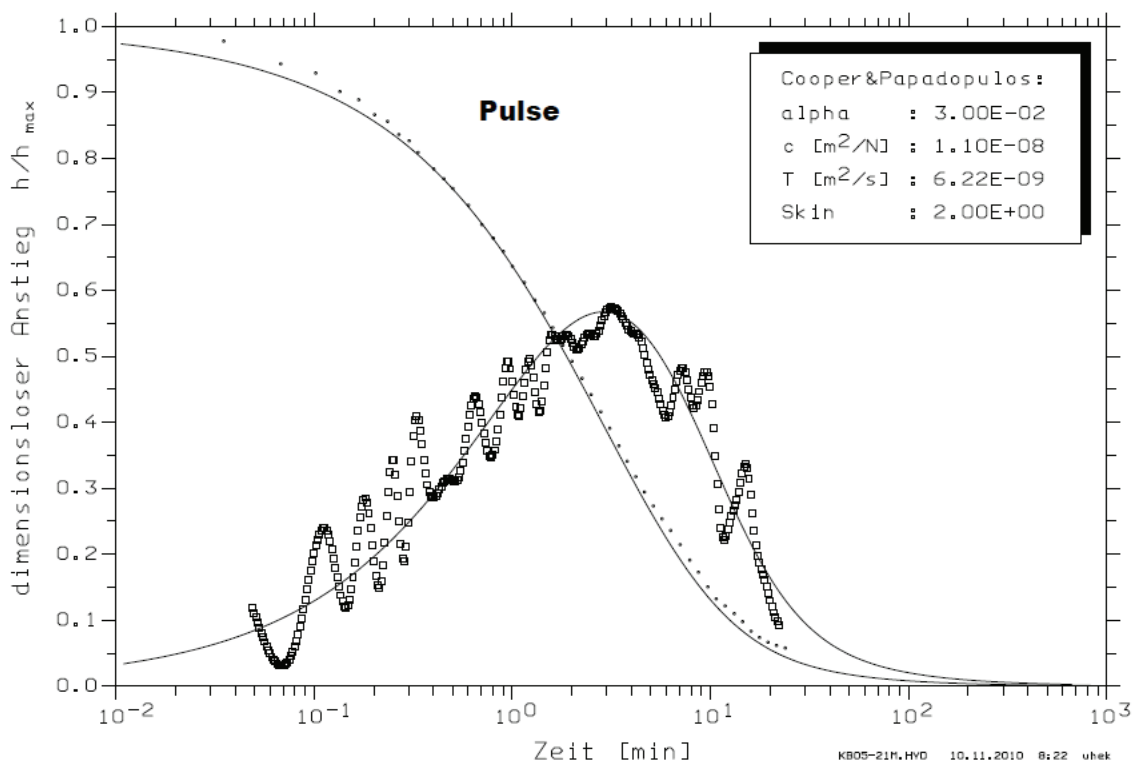


Bild 11: Normierte Auftragung der Daten des Pulsetests in der Bohrung BKF05, Bohrlochabschnitt 20,8-22,7 m (vgl. Bild 10) und Anpassung mit der Typkurvenvorlage nach Cooper et al. (1967)

Drill-Stem-Test

Drill-Stem-Tests eignen sich zur Durchlässigkeitsbestimmung in schwach durchlässigem Untergrund (ca. $k = 10^{-6}$ bis 10^{-8} m/s). Der Drill-Stem-Test besteht aus einer Fließ- und einer Schließphase. Das Testventil bleibt geöffnet, bis aus der Änderung Δs der Wassersäule im Testrohr mit dem Radius r_0 über die Zeit Δt eine Fließrate $Q = (\Delta s \pi r_0^2) / \Delta t$ bestimmt werden kann. Hierzu wird der anfängliche lineare Anstieg in der Größenordnung von einigen cm bis wenigen dm (i. d. R. einige bis maximal 10 Prozent) der maximalen Druckhöhenänderung benötigt. Danach wird die Fließphase durch Schließen des Ventils beendet. Während der Schließphase wird die Wiedereinstellung des Ruhedrucks im Testabschnitt gemessen. Mit der bestimmten Fließrate Q kann der Druckverlauf nach Schließen des Testventils (Schließphase) wie ein Wiederanstieg nach einem Pumpversuch (siehe DIN 22282-4 (2008)) bzw. wie eine Druckerholung nach einem Injektionsversuch betrachtet und auch so ausgewertet werden.

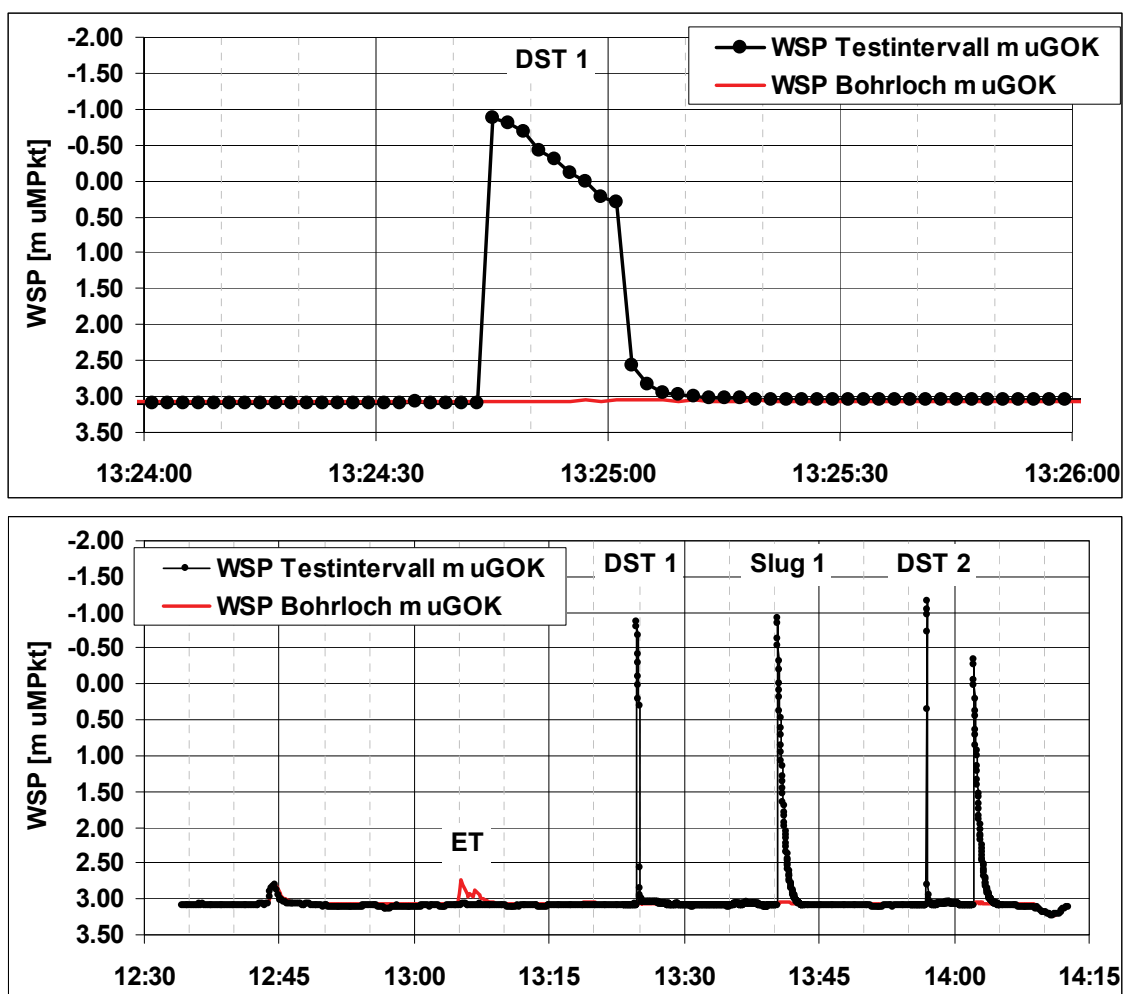


Bild 12: Schleuse Besigheim, BKF04, Bohrlochabschnitt 8,0-10,0 m (Einzelpacker gegen Bohrlochsohle): Testfolge aus DST und Slug-Tests (oben) und Detaildarstellung des 1. DST mit Fließphase (13:24:43 Uhr bis 13:25:01 Uhr) und Schließphase (13:25:02 Uhr bis 13:26:00 Uhr) (unten)

Bild 12 zeigt ein Beispiel einer Sequenz mit DST und Slug-Tests in der Bohrung Schleuse Besigheim BKF04 im Bohrlochabschnitt 8,0-10,0 m. Nach dem Setzen des Packers um 12:44 Uhr ist um 13:05 Uhr der Eingießtest erkennbar, bei dem durch Eingießen von Wasser ins Bohrloch die Dichtigkeit des Packers überprüft wurde. Bleibt der Druck im Testabschnitt unverändert, so kann von einer guten Abdichtung ausgegangen werden. Um 13:25 Uhr folgt ein erster DST, um 13:40 Uhr ein Slug-Test und um 13:57

Uhr ein zweiter DST. Gegenstand des Auswertbeispiels ist der erste DST, der in der Bild 12 unten in zeitlich genauerer Auflösung zu sehen ist. Das Testventil wurde hierbei um 13:24:43 Uhr bei einem hydraulischen Ruhepotenzial von ca. 3 m unter Gelände geöffnet. Danach kann die bei ca. 1 m über Gelände stehende Testrohrwassersäule langsam ins Gebirge abfließen. Durch Schließen des Testventils um 13:25:01 Uhr wird die Fließphase beendet und die Einstellung des Ruhepotenzials gemessen (Schließphase). Mit dem Testrohrdurchmesser von 47 mm kann aus der Wasserspiegelabsenkung von ca. 1,3 m über eine Fließphase von ca. 15 Sekunden eine „Injektionsrate“ von 0,147 l/s berechnet werden.

Bild 13 zeigt die Auswertung der Schließphase des DST mit dem Typkurvendeckungsverfahren nach Gringarten und Bourdet. Die Schließphase nach einem DST wird damit wie der Wiederanstieg nach einem Pumpversuch bzw. der Druckwiederabfall nach einem KRI behandelt. Mit dem aus der Typkurvendeckung erhaltenen Transmissivitätswert von $1,8 \cdot 10^{-4}$ m²/s errechnet sich bei 2 m Teststrecke ein Durchlässigkeitsbeiwert von $9 \cdot 10^{-5}$ m/s.

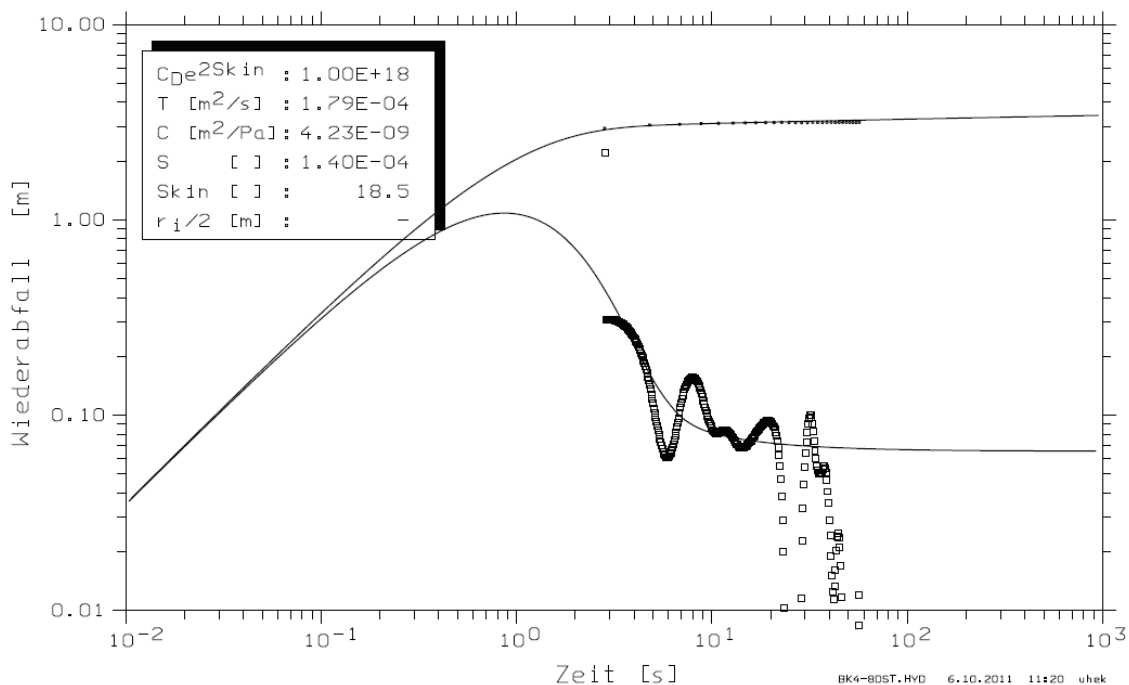


Bild 13: Bestimmung der Transmissivität T für die Schließphase des DST in BKF04, Bohrlochabschnitt 8,0-10,0 m, mittels Typkurvendeckungsverfahren nach Gringarten und Bourdet

Das Ergebnis liegt damit deutlich über dem Durchlässigkeitsbereich, für den der DST idealerweise das geeignete Verfahren darstellt. Mit entsprechend kurzen Fließphasen kann der DST jedoch auch in durchlässigem Untergrund eingesetzt werden. Ein Nachteil der kurzen Fließphase ist jedoch, dass der Versuch nur eine geringe Reichweite um das Bohrloch erreicht. Bei einem KRI können mit entsprechend langen Injektionsphasen größere Reichweiten erzielt werden. Das Ergebnis wäre dann für ein entsprechend größeres Gebirgsvolumen repräsentativ.

Mit entsprechend langen Fließphasen können mittels DST auch Werte in sehr schwach durchlässigem Untergrund bestimmt werden. Vorteil gegenüber dem Pulse-Test wäre dabei eine größere Reichweite, Nachteil allerdings eine deutlich längere Testdauer.

Literatur

- Bourdet, D., Whittle, T.M., Douglas, A.A., Pirard, Y.M. (1983): A new set of type curves simplifies well test analysis. – *World Oil* (May 1983), 7 S., 10 Abb., 3 Tab.; Houston, Texas, U.S.A.
- Cooper, H.H., JR., Bredehoeft, J.D., Papadopulos, I.S. (1967): Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. – *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 263-269.
- DGEG (1984): Wasserdruckversuch in Fels - Empfehlung Nr. 9 des Arbeitskreis 19 - Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.
- DIN EN ISO 22282-3 (2008): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geohydraulische Versuche - Teil 3: Wasserdruckversuch im Fels; Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-4 (2008): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geohydraulische Versuche - Teil 4: Pumpversuche; Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22282-6 (2008): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geohydraulische Versuche - Teil 6: Wasserdurchlässigkeitsversuche im Bohrloch unter Anwendung geschlossener Systeme; Beuth-Verlag, Berlin.
- Gringgarten, A.C., Bourdet, D., Landell, P.A., Kniazeff, V.J. (1979): A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis. – Presented at the SPE-AIME 54th Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, SPE-8205; Las Vegas, Nevada.