

## Fallbeispiel: K-Wert Bestimmung im Umfeld eines Grundwasserbrunnens

Um die zusammengefasste Theorie zu veranschaulichen, werden hier die verschiedenen behandelten Methoden anhand eines Fallbeispiels durchgerechnet. Im Anschluss werden die Ergebnisse miteinander verglichen und diskutiert.

### Ausgangslage

Bei diesem Fallbeispiel handelt es sich um einen Grundwasserbrunnen, welcher seit 2013 in Betrieb ist. Um die Leistung des Brunnens aufrecht erhalten zu können, wurde der Brunnen im vergangenen Herbst entsandet und gereinigt. Im Anschluss wurde ein dreistufiger Kurzpumpversuch während einer Dauer von 14 h durchgeführt. Die Absenkung wurde im selben Brunnen im Minutentakt aufgezeichnet. Der Versuch wurde anschliessend nach Dupuits-Thiem ausgewertet und es konnte so ein K-Wert von  $3.50 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  bestimmt werden.

Nach der Durchführung des Pumpversuches wurde die Pumpe im Brunnen in Betrieb genommen. Seither wird in diesem GW-Brunnen mit einer konstanten Rate von  $57.5 \text{ m}^3/\text{h}$  Wasser gepumpt. Im Abstrom des GW-Brunnens befinden sich diverse Piezometer, welche im Stundentakt den GW-Spiegel messen. Für die Anwendung der verschiedenen Methoden werden daher nicht die Daten des Pumpversuches selber verwendet (da nur über eine relativ kurze Zeit gepumpt wurde), sondern diejenigen, die seit dem Start des Pumpbetriebes aufgezeichnet wurden.

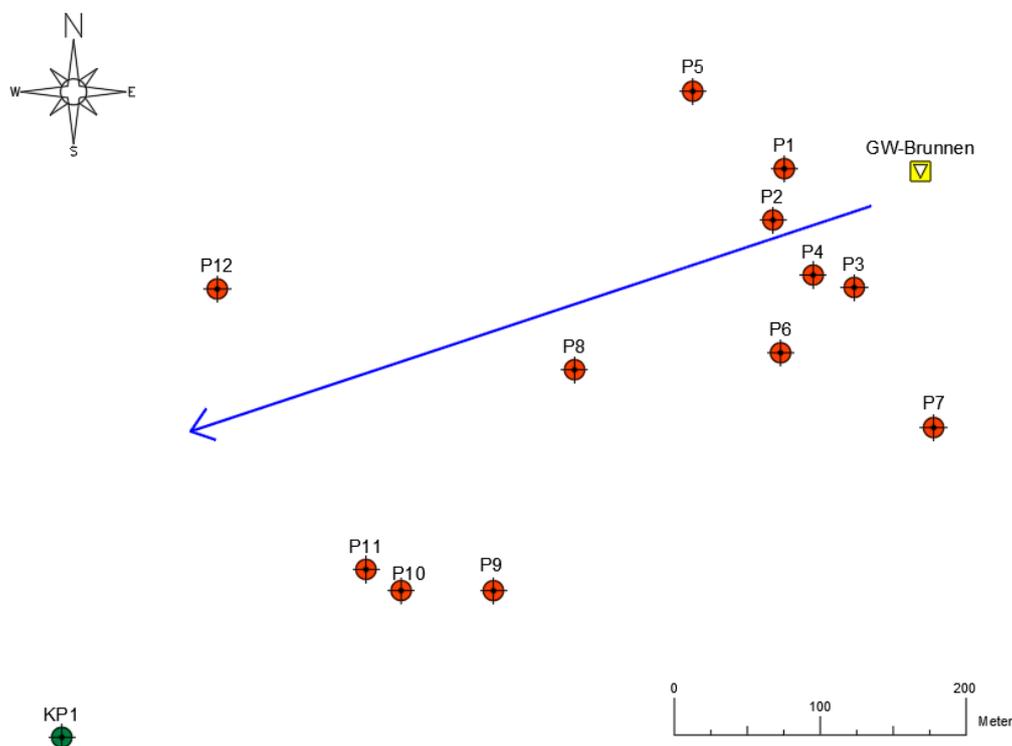


Abbildung 4: Situationsplan. Gelb: Pumpbrunnen, orange Punkte: Überwachungspiezometer mit kontinuierlichen GW-Spiegel-Messungen, grüner Punkt: Kontrollpunkt ohne Absenkung, blauer Pfeil: grobe GW-Fliessrichtung.

Für die Auswertungen nach den verschiedenen Methoden wurden die Grundwasserspiegeldaten von 10 verschiedenen Piezometern über einen Zeitraum von 270 h verwendet (vgl. Abbildung 4). Die Piezometer P5 und P12 liegen nahe an einem Fluss und zeigten keine Absenkung. Diese Piezometer wurden daher in den folgenden Berechnungen nicht miteinbezogen. Der Zeitraum von 270 h wurde so gewählt, da ca. 12 Tage nach Pumpbeginn ein grösseres Niederschlagsereignis folgte, welches den Grundwasserspiegel stark ansteigen liess und so die Auswertung der GW-Absenkungen verfälschen könnte. Da innerhalb dieses Zeitraumes neben der Absenkung durch den Pumpbetrieb der

Grundwasserspiegel auch natürlichen Schwankungen ausgesetzt war, wurden die Daten vor der Auswertung mithilfe eines vom Pumpbetrieb unbeeinflussten Piezometers korrigiert (KP1 in Abbildung 4).

Für die anschließenden Berechnungen wurden folgende Werte verwendet:

Pumprate **Q**: 57.5 m<sup>3</sup>/h  
 Dauer **t**: 270 h = 16'200 min = 972'000 s  
 Mächtigkeit **b**: 17 m

Beim betroffenen Projektgebiet handelt es sich um einen freien Aquifer. Da aber über eine relativ lange Zeit gepumpt wurde, können die im Theorieteil beschriebenen Methoden für einen gespannten Aquifer angewendet werden.

## Theis Methode – ein Beobachtungsbrunnen

### Berechnungen

Die genaue Vorgehensweise für die verschiedenen Methoden wird im Theorieteil genau beschrieben. Bei der Theis Methode für einen Beobachtungsbrunnen wird in einem ersten Schritt die Datenkurve eines Piezometers auf die Theis Typkurve gelegt. In Abbildung 5 wird das anhand eines Beispiels des Piezometers P4 aufgezeigt. Dies wurde für alle Piezometer entsprechend durchgeführt.

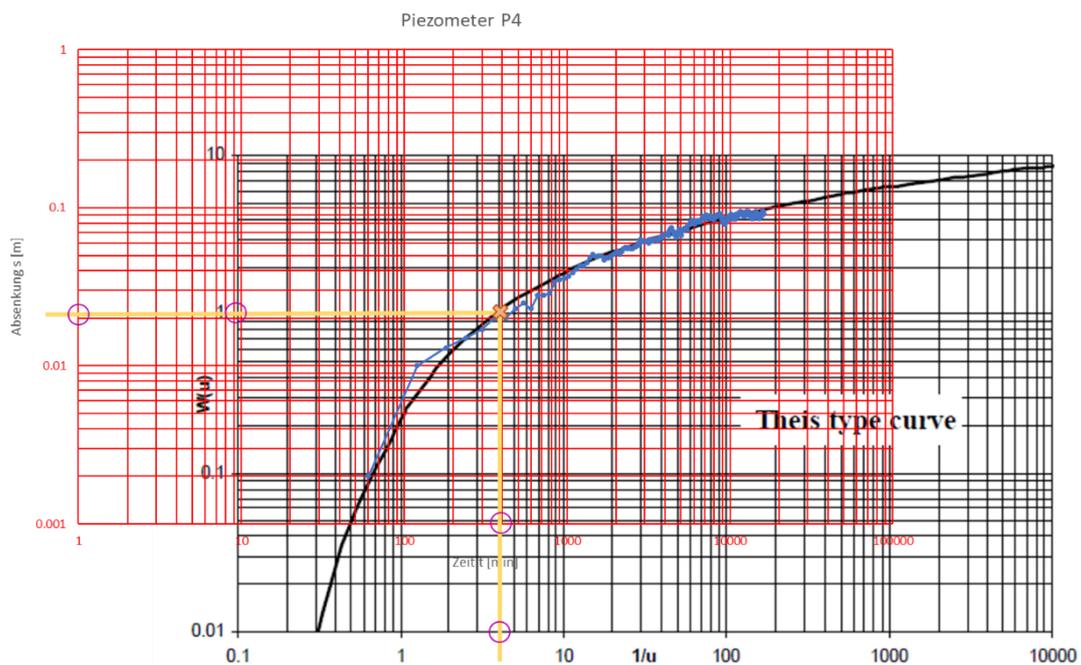


Figure 4. Theis type curve for  $1/u$  versus  $W(u)$

Abbildung 5: Theis Typkurve mit Datenkurve aus dem Piezometer P4. Bei violetten Kreisen werden die für die Berechnungen benötigten Werte abgelesen.

Für das Piezometer P4 konnten so folgende Werte aus Abbildung 5 abgelesen werden:

	s [m]	t [min]	$1/u$	$W(u)$
Piezometer P4	0.022	390	4	1

Werden diese Werte in die Formeln (1), (2) und (3) eingesetzt, ergeben sich folgende Resultate für die hydraulischen Parameter:

$$T = \frac{Q}{4 * \pi * s} * W(u) = \frac{0.015972 \text{ m}^3/\text{s}}{4 * \pi * 0.022 \text{ m}} * 1 = 0.058 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 4 * T * u * \left(\frac{t}{r^2}\right) = 4 * 0.058 \text{ m}^2/\text{s} * 4 * \left(\frac{23'400 \text{ s}}{(102 \text{ m})^2}\right) = 2.087$$

$$K = T / b = \frac{0.058 \text{ m}^2/\text{s}}{17 \text{ m}} = 3.41 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

Wird dieses Prozedere mit den Daten sämtlicher Überwachungspiezometern durchgeführt, ergeben sich die untenstehenden K-Werte. Da die Piezometer jeweils sehr unterschiedliche Distanzen zum Pumpbrunnen haben, wurden diese in drei Gruppen (je nach Distanz) unterteilt.

	Piezometer	K-Wert [m/s]	Ø K-Wert [m/s]
Gruppe 1	P1	$3.12 * 10^{-3}$	$3.07 * 10^{-3}$
	P2	$2.77 * 10^{-3}$	
	P3	$2.99 * 10^{-3}$	
	P4	$3.41 * 10^{-3}$	
Gruppe 2	P6	$2.58 * 10^{-3}$	$3.17 * 10^{-3}$
	P7	$2.27 * 10^{-3}$	
	P8	$4.67 * 10^{-3}$	
Gruppe 3	P9	$4.67 * 10^{-3}$	$1.29 * 10^{-2}$
	P10	$2.33 * 10^{-2}$	
	P11	$1.07 * 10^{-2}$	

### Fazit

Die meisten der K-Werte bewegen sich in einem ähnlichen Rahmen zwischen  $2.77 * 10^{-3}$  m/s bis  $4.67 * 10^{-3}$  m/s. Die ersten beiden Gruppen zeigen im Durchschnitt ebenfalls sehr ähnliche Werte. Für die beiden Piezometer P10 und P11 sind die Ergebnisse fast eine Zehnerpotenz höher, was auch den Durchschnitt der dritten Gruppe deutlich erhöht. Über das gesamte Projektgebiet gemittelt ergäbe sich so ein K-Wert von  $6.05 * 10^{-3}$  m/s.

## Theis Methode – mehrere Beobachtungsbrunnen

### Berechnungen

Bei dieser Methode wird versucht, sämtliche Datenkurven von allen Beobachtungspiezometern zusammen möglichst passend auf die Theis-Typkurve zu legen (vgl. Abbildung 6). Schnell wird deutlich, dass je nachdem wie gut die einzelnen Kurven übereinander passen, mit grösseren oder kleineren Unsicherheiten gerechnet werden muss. Daher wurden in einem zweiten Schritt die einzelnen Piezometergruppen noch einmal individuell ausgewertet. Die Berechnungen werden anschliessend ebenfalls mit den Formeln (1), (2) und (3) ausgeführt.

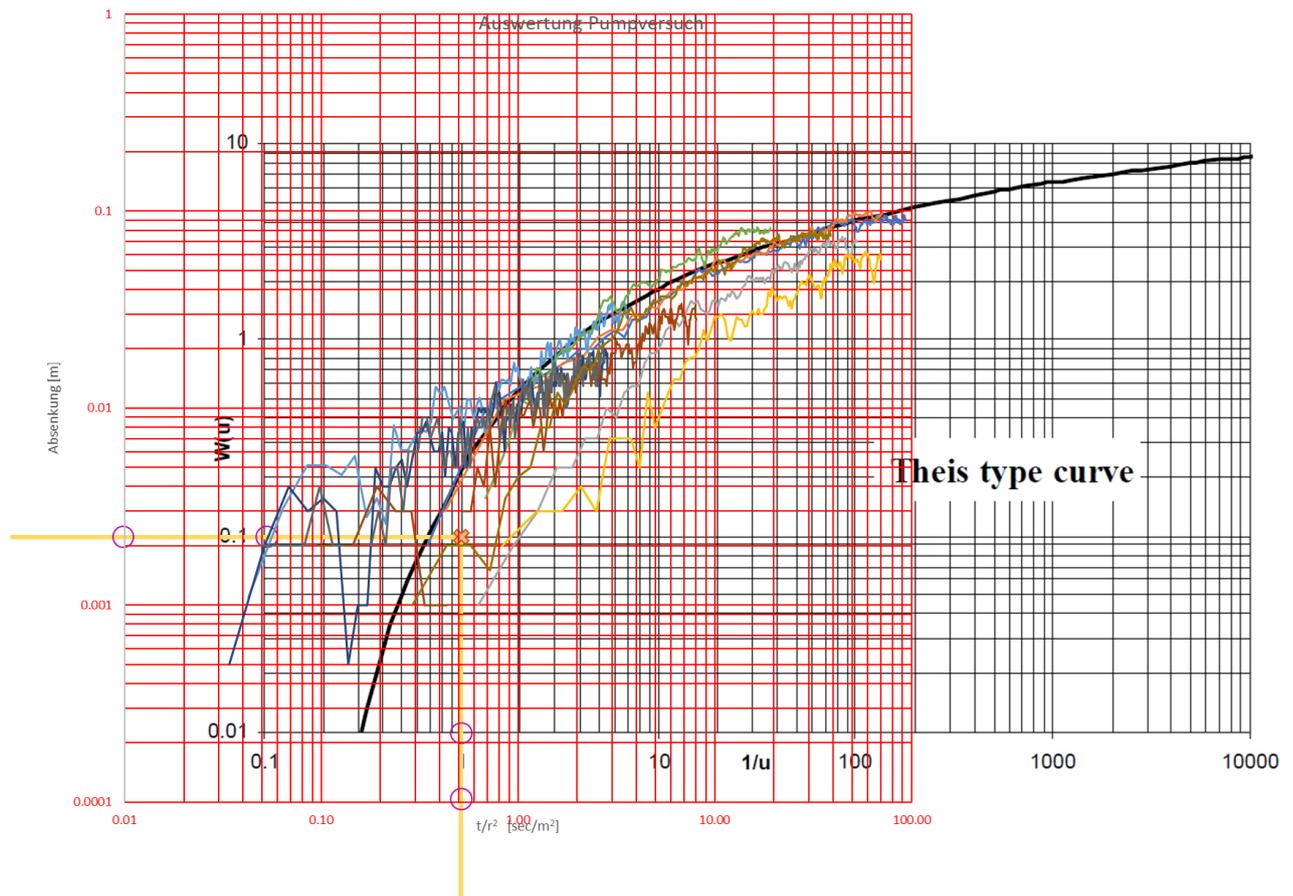


Abbildung 6: Theis Typkurve mit Datenkurven sämtlicher Piezometer. Die für die Berechnungen benötigten Werte werden bei den violetten Kreisen abgelesen.

Aus Abbildung 6 wurden folgende Werte abgelesen:

	s [m]	t/r² [s/m²]	1/u	W(u)
Alle Piezos	0.0022	0.51	1	0.1

$$T = \frac{Q}{4 * \pi * s} * W(u) = \frac{0.015972 \text{ m}^3/\text{s}}{4 * \pi * 0.0022 \text{ m}} * 0.1 = 0.058 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 4 * T * u * \left(\frac{t}{r^2}\right) = 4 * 0.058 \text{ m}^2/\text{s} * 1 * 0.51 \text{ s/m}^2 = 0.12$$

$$K = T / b = \frac{0.058 \text{ m}^2/\text{s}}{17 \text{ m}} = 3.41 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

Daraus ergeben sich für die einzelnen Piezometergruppen folgende K-Werte:

	Piezometer	K-Wert [m/s]	Ø K-Wert [m/s]
Gruppe 1	P1	$1.63 \cdot 10^{-3}$	$3.41 \cdot 10^{-3}$
	P2		
	P3		
	P4		
Gruppe 2	P6	$1.02 \cdot 10^{-3}$	
	P7		
	P8		
Gruppe 3	P9	$8.31 \cdot 10^{-3}$	
	P10		
	P11		

### Fazit

Auch hier fällt auf, dass die K-Werte der ersten beiden Piezometergruppen etwa in einem ähnlichen Rahmen liegen. Der K-Wert der dritten Piezometergruppe ist erneut deutlich erhöht im Vergleich zu den ersten beiden Gruppen. Der Durchschnittswert über das gesamte Projektgebiet wurde ebenfalls anhand der graphischen Auswertung nach Theis ermittelt (entspricht nicht dem Durchschnitt der drei Gruppen). Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Werte etwa einen Drittel tiefer liegen, als bei der Einzelauswertung der verschiedenen Piezometer nach Theis.

## Jacob Methode – ein Beobachtungsbrunnen

### Berechnungen

Bei der Jacob Methode wird jeweils eine Linie durch die Datenkurve gezogen, welche vor allem möglichst passend über den zeitlich späteren Daten liegen soll. Hier wurde dies ebenfalls beispielhaft für das Piezometer P4 abgebildet (vgl. Abbildung 7).

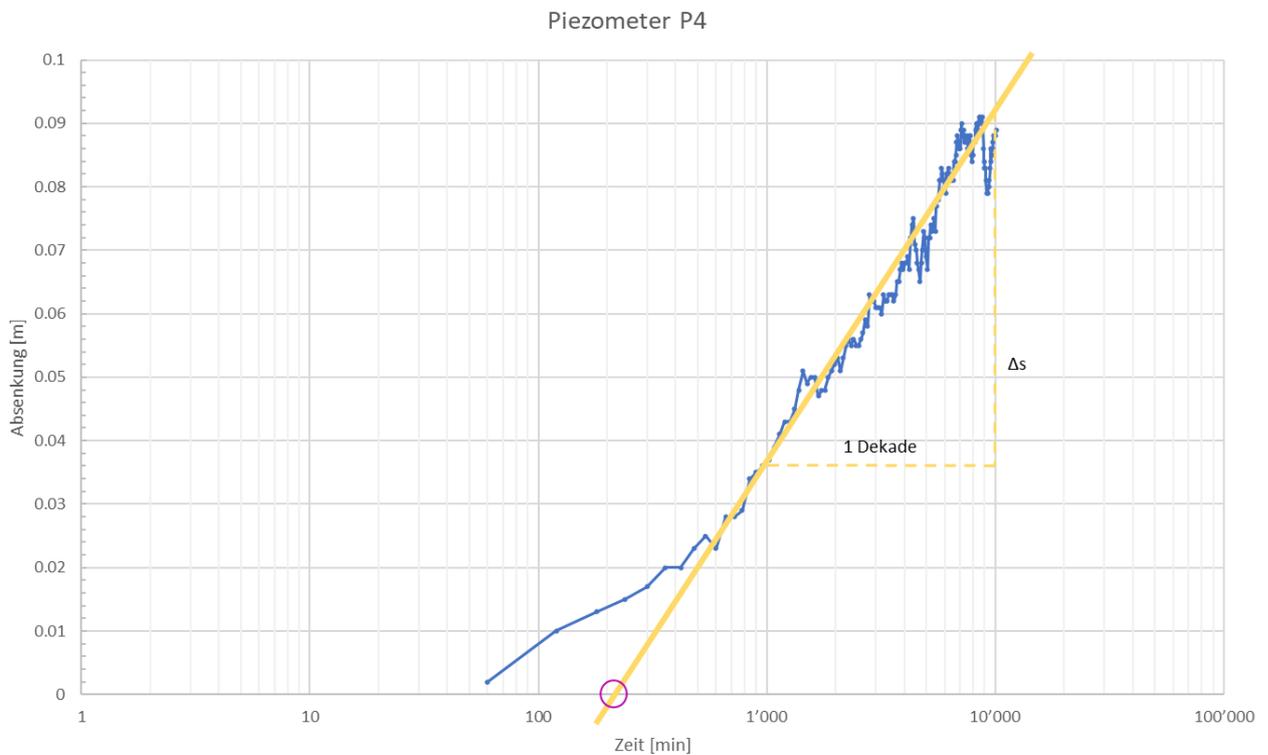


Abbildung 7: Jacob Methode für einen Brunnen – Datenkurve für das Piezometer P4 mit angelegter Geraden. Daraus können  $\Delta s$  und  $t_0$  (violetter Kreis) abgelesen werden.

Die Werte, die sich so ablesen lassen, sind folgende:

	$\Delta s$ [m]	$t_0$ [min]
Piezometer P4	0.056	230

Werden diese Werte in die Formeln (9) und (10) eingefügt, kommt man auf folgende Resultate:

$$T = \frac{2.3 * Q}{4 * \pi * \Delta s} = \frac{2.3 * 0.015972 \text{ m}^3/\text{s}}{4 * \pi * 0.056 \text{ m}} = 0.052 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{2.25 * 0.052 \text{ m}^2/\text{s} * 13'800 \text{ s}}{(102 \text{ m})^2} = 0.155$$

$$K = T / b = \frac{0.052 \text{ m}^2/\text{s}}{17 \text{ m}} = 3.06 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

Wie bei der Theis Methode wurde dies analog für alle Piezometer durchgeführt. So erhält man folgende K-Werte:

	Piezometer	K-Wert [m/s]	Ø K-Wert [m/s]
Gruppe 1	P1	$4.19 * 10^{-3}$	$3.43 * 10^{-3}$
	P2	$3.51 * 10^{-3}$	
	P3	$2.96 * 10^{-3}$	
	P4	$3.06 * 10^{-3}$	
Gruppe 2	P6	$3.18 * 10^{-3}$	$4.63 * 10^{-3}$
	P7	$4.09 * 10^{-3}$	
	P8	$6.61 * 10^{-3}$	
Gruppe 3	P9	$5.93 * 10^{-3}$	$7.66 * 10^{-3}$
	P10	$5.55 * 10^{-3}$	
	P11	$1.15 * 10^{-2}$	

#### Fazit

Mit Ausnahme des Piezometers P11 gibt es hier keine allzu grossen Ausreisser, wenn auch die Variationen zwischen den einzelnen Piezometern teilweise ziemlich deutlich sind. Die dritte Piezometergruppe zeigt auch bei dieser Methode im Schnitt erhöhte K-Werte im Vergleich zu den anderen beiden Gruppen. Für das gesamte Projektgebiet ergäbe sich ein durchschnittlicher K-Wert von  $5.06 * 10^{-3}$  m/s.

## Jacob Methode – mehrere Beobachtungsbrunnen

### Berechnungen

Für diese Methode wurde für alle Piezometer die Absenkung nach einer bestimmten Zeit  $t_c$  betrachtet ( $t_c = 972'000$  s). Somit ergibt für jede Messstelle ein Punkt auf der untenstehenden Graphik (vgl. Abbildung 8), wodurch anschliessend eine Gerade gezogen wird:

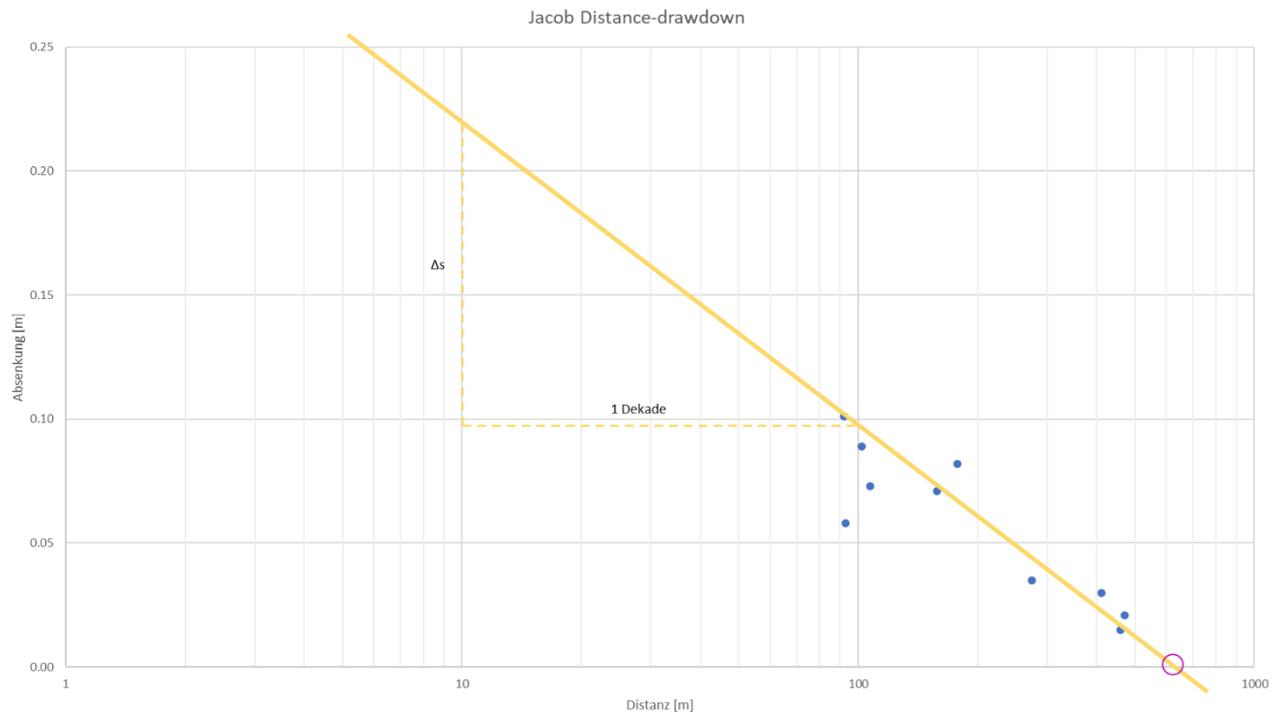


Abbildung 8: Jacob Methode für mehrere Brunnen – Datenpunkte sämtlicher Piezometer. Daraus können  $\Delta s$  und  $r_0$  (violetter Kreis) abgelesen werden.

Daraus können folgende Werte abgelesen werden:

	$\Delta s$ [m]	$r_0$ [m]
Alle Piezometer	0.125	620

Mithilfe der Formeln (12) und (13) ergeben sich schliesslich folgende Resultate:

$$T = \frac{2.3 * Q}{2 * \pi * \Delta s} = \frac{2.3 * 0.015972 \text{ m}^3/\text{s}}{2 * \pi * 0.125 \text{ m}} = 0.047 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{2.25 * T * t_c}{r_0^2} = \frac{2.25 * 0.047 \text{ m}^2/\text{s} * 972'000 \text{ s}}{(620 \text{ m})^2} = 0.267$$

$$K = T / b = \frac{0.047 \text{ m}^2/\text{s}}{17 \text{ m}} = 2.76 * 10^{-3} \text{ m/s}$$

Da für diese Methode möglichst viele Datenpunkte von Vorteil sind, wurde hier nicht nach den verschiedenen Messpunktgruppen unterteilt.

Mithilfe der Formel (11) kann berechnet werden, bis zu welcher Distanz die Datenpunkte in die Auswertung miteinbezogen werden dürfen. Hier wird für  $u$  ein Wert von 0.1 angenommen:

$$r = \sqrt{\frac{4 * T * u * t}{S}} = \sqrt{\frac{4 * 0.047 \text{ m}^2/\text{s} * 0.1 * 972'000 \text{ s}}{0.267}} = 262 \text{ m}$$

### Fazit

Der durch die Jacob Distance-drawdown erhaltene K-Wert von  $2.76 \cdot 10^{-3}$  m/s liegt im Schnitt etwas tiefer als bei den anderen Methoden, scheint aber immer noch angemessen. Da die Punkte teilweise eine grosse Streuung aufzeigen, ist dieser Wert mit einer gewissen Unsicherheit belastet. Der kritische Radius  $r$ , bis zu welchem die Datenpunkte miteinbezogen werden dürfen, wurde hier auf 262 m berechnet. Dies würde bedeuten, dass die vier hintersten Punkte in Abbildung 8 theoretisch weggelassen werden müssten. Werden diese Punkte aber gelöscht, wird es schwierig, überhaupt noch eine Gerade durch die Datenpunkte ziehen zu können, weshalb sie für dieses Beispiel stehen gelassen werden.

### Auswertung / Diskussion der Resultate

Mit den vier verschiedenen Methoden wurden Gebiets-K-Werte zwischen  $2.57 \cdot 10^{-3}$  m/s und  $6.05 \cdot 10^{-3}$  m/s bestimmt, was etwas mehr als einem Faktor 2 Unterschied entspricht. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich bei allen vier Methoden um graphische Auswertungen handelt, welche nur schon dadurch, wie man die Datenkurven an die Theis-Typkurve oder bei der Jacob Methode an eine Gerade anlegt, grössere Differenzen entstehen lässt und daher auch mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind. Weiter muss beachtet werden, dass die Überwachungspiezometer teilweise in grosser Distanz zum Pumpbrunnen stehen. So konnten in der dritten Piezometergruppe gerade noch Absenkungen von ca. 1.5 bis 3 cm beobachtet werden, was bald auch natürlichen Schwankungen zugeschrieben werden könnte. Dafür können Falschmessungen aufgrund von turbulentem Fluss mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, da keine der Messstellen allzu nah am Pumpbrunnen steht.

Grundsätzlich können diverse Faktoren zu Unsicherheiten oder Fehlern in den Berechnungen geführt haben:

- Natürliche Schwankungen im GW-Spiegel, die je nach Lokalität des Messpunktes stärker oder schwächer ausfallen können
- Die Nähe zum nördlich der Messpunkte gelegenen Flusses, welcher die gemessene Absenkung durch den Pumpbetrieb abschwächen kann
- Distanz des Messpunktes zum Pumpbrunnen
- Natürliche Variationen in der Durchlässigkeit des Aquifers, was bei einem solch grossen Projektgebiet auch zu erwarten ist

Der tatsächliche durchschnittliche K-Wert des Projektgebiets wird also wahrscheinlich irgendwo zwischen diesen beiden Extremen liegen. Der anfänglich mit dem dreistufigen Kurzpumpversuch erhaltene K-Wert von  $3.50 \cdot 10^{-3}$  m/s scheint also nicht allzu falsch zu sein. Die K-Werte der ersten beiden Piezometergruppen stimmen meist gut miteinander überein. Es wird daher angenommen, dass der tatsächliche K-Wert im Bereich zwischen  $3.0 \cdot 10^{-3}$  m/s -  $3.5 \cdot 10^{-3}$  m/s liegt.

Ob eine Methode nun genauer ist bzw. „richtigere“ Ergebnisse liefert als die andere, ist im Rahmen dieser Arbeit schwer zu bestimmen. Rein von der Anwenderfreundlichkeit her ist die Jacob Methode sicher einfacher, übersichtlicher und schneller in der Anwendung. Daher wäre für zukünftige Projekte diese Methode sicher vorzuziehen. Wichtig ist auf jeden Fall, möglichst immer die gleiche Methode auf die gleiche Art und Weise zu verwenden, um Fehler aufgrund von subjektiven Interpretationen der graphischen Darstellungen minimieren zu können.