

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)
an der Universität für Bodenkultur Wien



PUMPVERSUCHSAUSWERTUNG VON SCHACHTBRUNNEN

Vergleich von Lösungsansätzen

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur (DI)

eingereicht von
Simon Leitner

Betreuer: Univ. Prof. DI Dr. Willibald Loiskandl
Dipl.-Geow. Dr. Andreas Schwen
Ass.-Prof. DI Dr. Gerhard Kammerer

Wien, Juli 2012

Danksagung

An dieser Stelle wende ich mich an all jene, die mich am Weg – Masterarbeit begleitet haben.

An erster Stelle ist mein Hauptbetreuer Univ.-Prof. DI Dr. Willibald Loiskandl zu nennen, bei dem stets eine offene Tür anzufinden war. Der hohe fachliche Gradient zwischen Lehrendem und Lernendem wirkte sich äußerst positiv auf den Wissensfluss aus. Problemstellungen konnten rasch und effizient, in einer angenehmen Atmosphäre gelöst werden.

Auch Dipl.-Geow. Dr. Andreas Schwen bin ich zu Dank verpflichtet. Er betreute mich speziell bei der Auswertung und bei der eigentlichen Verfassung meiner Arbeit. Die Arbeit mit ihm zeichnete sich durch einen qualitativen und doch raschen Lösungsweg aus.

Ass.-Prof. DI Dr. Gerhard Kammerer stand mir speziell bei „kurzen Fragen“ hilfreich zur Seite. Ich möchte mich für die fachkundige Unterstützung bedanken.

Weiters möchte ich allen Mitarbeitern des Institutes für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, die mich bei meiner Arbeit in Tat und Wort unterstützt haben, herzlich danken.

Mag. Dr. Markus Gmeindl war mir auch bei der Auswertung eine Hilfe. Er unterstützte mich tatkräftig bei der Erstellung eines meiner numerischen Brunnenmodelle.

Großer Dank gebührt auch den Mitarbeitern des wasserbaulichen Labors. Allen voran den Herren Heinz Fassel und Thomas Lehner. Diese unterstützten mich fachlich bei der Planung meines Brunnenmodells und ließen mir auch Freiräume zur eigenständigen Arbeit.

In Bezug auf die familiäre Unterstützung möchte ich mich an meine Großmutter Edeltrud Csmarits wenden, die stets ein wichtiger Wegbegleiter in meinem Leben war und ist.

Zuletzt danke ich noch Johanna Smolle, die mich durch mein Leben begleitet. Synergie und Toleranz stehen dabei als Erfolgsrezept im Vordergrund.

Simon Leitner

Wien, Juli 2012

Abstract

The possible techniques for collecting and pumping of groundwater are manifold and often very specific. An old reliable, but not always economically optimal possibility is the construction of a dug well. This type clearly differentiates itself from other wells through its geometric characteristics. Groundwater can only enter through the well bottom. As simple as this situation may sound, there is a lack of correct mathematical description of the system dug well. This thesis aims to characterize suitable methods for the evaluation of a pumping test of dug wells. A pumping test is used to calculate the hydraulic soil parameters of the drainage area, which are decisive for the dimensioning of a dug well. Specifically the hydraulic conductivity is considered to be the determined variable at a pumping test analysis, since it is mainly responsible for the well catchment area and its hydraulic and soil physical characterization.

Since field pumping tests are linked to many assumptions and, therefore, a scientific unfavorable base for interpretations, laboratory tests were carried out to establish a redundant data base. The laboratory tests comprised well pumping tests at a physical model with predefined boundary conditions. The laboratory tests consisted of steady- and unsteady-state pumping tests. To define the target value the hydraulic conductivity additional laboratory measurements were carried out.

The analysis was divided into the analysis of the flow nets, produced during the pumping tests in the well model and the interpretation of the pumping test variables. Furthermore, an attempt was made by using available, but not for the dug well designed, well evaluating formulas. At last calculations were made using numerical simulation programs (Hydrus 2D, PMWIN).

The results showed that there are satisfactory methods for the evaluation of pumping tests on a dug well. On one hand, a formula for solving the laboratory well pumping test was found and on the other hand, some existing well formulas proved to be operational. From a practical viewpoint it has to be mentioned that the numerical simulation programs proved to be the best evaluation methods due to their versatility to specific field conditions.

Kurzfassung

Die technischen Möglichkeiten zur Fassung und Förderung von Grundwasser sind vielfältig und oft sehr spezifisch. Eine alt bewährte, jedoch technisch und wirtschaftlich nicht immer optimale Variante, ist der Bau eines Schachtbrunnens. Dieser grenzt sich klar von anderen Brunnentypen durch seine Fassungscharakteristik ab. Grundwasser kann nur durch die Brunnensohle in den Brunnen eintreten. So simpel dieser Sachverhalt auch klingt, mangelt es an mathematischen Beschreibungen für das System „Schachtbrunnen“. Diese Arbeit zielt auf die Charakterisierung von geeigneten Methoden zur Auswertung von Pumpversuchen im Schachtbrunnen ab.

Ein Pumpversuch dient zur Berechnung der hydraulischen und bodenphysikalischen Parameter des Brunneneinzugsgebiets, welche maßgebend für die Dimensionierung eines Brunnens sind. Speziell die Durchsatzrate (Kammerer, 2012) (auch Durchlässigkeitsbeiwert genannt) spielt bei der Pumpversuchsauswertung eine entscheidende Rolle. Diese gilt als eine, bei einer Pumpversuchsauswertung, zu bestimmende Größe, da sie hauptverantwortlich für die hydraulische und bodenphysikalische Charakterisierung des Brunneneinzugsgebiets ist.

Da im Feld meist inhomogene und anisotrope Verhältnisse vorgefunden werden, welche eine exakte Analyse von Prozessabläufen erschweren, wurden zur Schaffung einer redundanten Datengrundlage Laborversuche geplant und durchgeführt. An einem physischen Brunnenmodell wurden Pumpversuche unter bekannten Randbedingungen durchgeführt. Außerdem konnte die Soll-Durchsatzrate, als Ergebnis der Pumpversuchsauswertung, bereits vorweg im Labor bestimmt werden. Für die Auswertung wurden stationäre und instationäre Pumpversuche durchgeführt.

Die Auswertung gliederte sich in die Analyse der Potenzialverteilungen im Brunnenmodell sowie der Interpretation der Pumpversuchsdaten. Des Weiteren wurde versucht die Pumpversuche mit vorhanden, nicht für den Schachtbrunnen vorgesehenen, Brunnenformeln auszuwerten. Zuletzt kamen numerische Simulationsprogramme (Hydrus 2D, PMWIN) für die Pumpversuchsauswertung zum Einsatz.

Die Ergebnisse zeigten, dass es zufriedenstellende Methoden zur Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen gibt. Einerseits konnte eine Brunnenformel für die Auswertung der Pumpversuchsdaten des Labormodells gefunden werden, andererseits erwiesen sich einige bestehende Brunnenformeln als zielführend. Anwendungstechnisch ist jedoch hinzuzufügen, dass die verwendeten numerischen Simulationsprogramme die beste Auswertung, auf Grund ihrer Vielfältigkeit in der Anwendung auf spezifische Feldbedingungen, ermöglichten.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 theoretische Grundlagen	2
2.1 Das poröse Medium	2
2.2 Grundwasser	3
2.3 Grundwasserbewirtschaftung - Schachtbrunnen	3
2.4 Der Pumpversuch	4
2.5 Mathematische Beschreibung von Strömungsprozessen in porösen Medien	5
2.5.1 Gesetz von Darcy	5
2.5.2 Massenbilanz und Kontinuität	6
2.5.3 Potenzialtheorie	7
2.5.4 Rotationssystemmetrische Zuströmung zu einem Brunnen	9
3 Physisches Brunnenmodell	11
3.1 Modellinstandsetzung	11
3.2 Messnetz	12
3.2.1 Randbedingungen	12
3.3 Bodenmaterial	15
3.3.1 Korngrößenverteilung	16
3.3.2 Abschätzung der Durchsatzrate nach Hazen	17
3.3.3 Bestimmung der Durchsatzrate mittels Darcy-Versuch	18
3.4 Methodik der Versuche am physischen Brunnenmodell	22
3.4.1 stationärer Schachtbrunnenpumpversuch	22
3.4.2 instationärer Recoverytest	23
3.5 Methodik der Pumpversuchssimulation	23
3.5.1 Hydrus 2D - Methodik	24
3.5.2 PMWIN - Methodik	25
4 Ergebnisse und Diskussion	28
4.1 Analyse der Pumpversuchsdaten des physischen Brunnenmodells	28
4.1.1 Potenzialnetz	28
4.1.2 Q-r-s- k_s Beziehung – Methodik	33
4.2 Pumpversuchsauswertung	37
4.2.1 Pumpversuchsauswertung durch Brunnenformeln	37
4.2.2 Hydrus 2D – inverse Modellierung – Ergebnisse	45

4.2.3 PMWIN – Ergebnisse	46
5 Zusammenfassung	47
6 Literaturverzeichnis	51
7 Anhang.....	53
7.1 Verzeichnis Anhang	53
7.1.1 Tabellenverzeichnis.....	53
7.1.2 Abbildungsverzeichnis.....	54
7.2 Messnetz	54
7.3 Sieblinie	56
7.4 Gradienten beim Darcy-Versuch	75
7.5 Messprotokolle der stationären Pumpversuche (Versuchsreihe 1).....	75
7.6 Aufbereitung der Messdaten (Versuchsreihe 1, 2 und 3).....	77
7.7 Randbedingungen für die verwendeten Brunnenformeln.....	79
7.8 Auswertung der Brunnenformeln für die Versuchsreihen 1, 2 und 3.....	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Korngrößenverteilung von Versuchsboden 1 und 2.....	16
Tabelle 2:	Durchsatzrate nach Hazen (1893)	18
Tabelle 3:	Durchsatzrate für Versuchsboden 1 mittels Darcy-Versuch	20
Tabelle 4:	Durchsatzrate für Versuchsboden 2 mittels Darcy-Versuch	21
Tabelle 5:	Übersicht zur Durchsatzrate der Versuchsböden (Hölting, 1980).....	21
Tabelle 6:	Potenziale entlang der Stromlinien 1 und 2 bei Versuch Nr. 12 (Absenkung 100 cm).....	32
Tabelle 7:	Vergleich des maximalen Gradienten und der maximalen Reynolds-Zahl beim physikalischen Modellversuch und dem Darcy-Versuch (Versuchsboden 1).....	33
Tabelle 8:	Auswertungsgrundlage für Q-r-ks-s Beziehung bzw. Ergebnis der physischen Modellpumpversuche.....	34
Tabelle 9:	Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Förderraten.....	36
Tabelle 10:	Datengrundlage für die Berechnung der Durchsatzrate durch die angegebenen Brunnenformeln für Versuchsreihe 1 und 2.....	39
Tabelle 11:	Datengrundlage für die Berechnung der Durchsatzrate durch die angegebenen Brunnenformeln für Versuchsreihe 3.....	39
Tabelle 12:	Abgrenzung der angewendeten Brunnenformeln durch ihre Randbedingungen.....	40
Tabelle 13:	Durchsatzraten für die Versuchsreihen 1 und 2 berechnet mittels Hydrus 2D – inverse Modellierung	45
Tabelle 14:	Durchsatzraten für die Versuchsreihen 1 und 2 berechnet mittels PMWIN	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzipiskizze eines Schachtbrunnens.....	4
Abbildung 2:	Brunnenmodell vor Versuchsbeginn mit gleichen Potenzialhöhen in allen Messpunkten	11
Abbildung 3:	Aufbau der Messpunkte im Schnitt durch die Außenwand des Brunnenmodells ..	12
Abbildung 4:	Aufbau des Brunnenfilters.....	14
Abbildung 5:	Brunnenmodell (Geometrie, Messnetz, Randbedingungen).....	15
Abbildung 6:	Korngrößenverteilung von Versuchsböden 1 und 2.....	17
Abbildung 7:	Darcy-Versuch (Versuchsboden 1)	19
Abbildung 8:	Brunnenmodell während eines Pumpversuchs (Versuchsboden 1).....	22
Abbildung 9:	Hydrus 2D – Modellbedingungen	25
Abbildung 10:	PMWIN 8 – Modellbedingungen – Layer 11	26
Abbildung 11:	Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 30 cm	29
Abbildung 12:	Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 55 cm	29
Abbildung 13:	Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 75 cm	30
Abbildung 14:	Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 85 cm	30
Abbildung 15:	Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 100 cm	31
Abbildung 16:	Korrelation zwischen Förderhöhe und Absenkung	35
Abbildung 17:	Vergleich von gemessener und berechneter Förderrate	37
Abbildung 18:	Ergebnisse der Brunnenformeln für Versuchsreihe 1	43
Abbildung 19:	Ergebnisse der Brunnenformeln für Versuchsreihe 2 und 3	44
Abbildung 20:	Ergebnisse der angewandten Methoden zur Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen (Versuchsboden 1).....	49
Abbildung 21:	Ergebnisse der angewandten Methoden zur Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen (Versuchsboden 2).....	50

Formelverzeichnis

Formel 1:	Zusammensetzung des Bodenvolumens	2
Formel 2:	Zusammensetzung des Porenvolumens	2
Formel 3:	Porenanteil	2
Formel 4:	Definition der Zylinderkoordinaten.....	5
Formel 5:	Gesetz von Darcy	6
Formel 6:	Definition der Durchsatzrate als isotrop und homogen	6
Formel 7:	Massenbilanz bei stationären Verhältnissen	6
Formel 8:	Definition eines konservativen (wirbelfreien) Kraftfeldes	7
Formel 9:	Bernoulli-Gleichung in Zylinderkoordinaten.....	7
Formel 10:	Potenzialgradient in Zylinderkoordinaten	7
Formel 11:	Divergenz des Gesamtpotenzials.....	8
Formel 12:	Stromfunktion.....	8
Formel 13:	Potenzialfunktion	8
Formel 14:	Zusammenhang von Strom- und Potenzialfunktion	8
Formel 15:	Laplace-Gleichung in Zylinderkoordinaten	9
Formel 16:	Lösung der Laplace-Gleichung in Zylinderkoordinaten.....	9
Formel 17:	Definition des stationären Gesamtpotenzials	9
Formel 18:	Randpotenziallinie.....	10
Formel 19:	Randstromlinie.....	10
Formel 20:	Sickerlinie	10
Formel 21:	Durchsatzrate nach Hazen (1893)	17
Formel 22:	Ungleichförmigkeitszahl	17
Formel 23:	Formel nach Darcy.....	20
Formel 24:	lokaler Potenzialgradient zur Bestimmung der Re Zahl.....	32
Formel 25:	Umformung der Darcy-Gleichung.....	32
Formel 26:	Reynoldszahl	32
Formel 27:	Q-r-Beziehung	35
Formel 28:	Brunnenformel Leitner	36
Formel 29:	Brunnenformel nach Thiem.....	40
Formel 30:	Brunnenformel nach Lamb.....	40
Formel 31:	Brunnenformel nach Forchheimer.....	40
Formel 32:	Brunnenformel zur Auswertung eines Recoverytests nach Theis.....	40

Formel 33: Brunnenformel nach Sichardt.....	40
Formel 34: Brunnenformel nach Kozeny.....	40
Formel 35: Brunnenformel nach Thiem-Deputit	40
Formel 36: Brunnenformel nach Truelsen.....	40
Formel 37: Faustformel 1.....	41
Formel 38: Faustformel 2.....	41
Formel 39: Brunnenformel nach Dudgeon und Cox.....	41
Formel 40: Bohrlochmethode nach Ernst.....	41
Formel 41: Methode des aufsteigenden Wasserspiegels.....	41

1 Einleitung

Für die Fassung von Grundwasser stehen dem Planer und Praktiker nach dem heutigen Stand der Technik eine Vielzahl an technischen Möglichkeiten zur Disposition. Eine Möglichkeit stellt dabei der Bau eines Schachtbrunnens dar. Dieser ist als technisch sehr simple und daher schon lange angewandte Brunnenvariante zu verstehen. So simpel und alt dieser Brunnentyp auch ist, von der technischen Seite betrachtet scheint es, als wäre es ein noch relativ junger Typ. Dies kann vor allem daran liegen, dass er in fachlichen Kreisen als technisch nicht superior gilt und nur unter bestimmten Gegebenheiten eine optimale Lösungsvariante darstellt.

Herr Mag. Dr. Markus Gmeindl vom Ziviltechnikerbüro Niederbacher trat an das Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien mit einer geohydraulischen Frage heran. Er, respektive das Ziviltechnikerbüro Niederbacher, wollten wissen, ob es konkrete Methoden für die Auswertung von Pumpversuchen von Schachtbrunnen gibt. Aus dieser Fragestellung ergab sich die vorliegende Arbeit.

Unter der Zuhilfenahme von verschiedenen Auswertemethoden sollte obige Fragestellung beantwortet werden. Zu Beginn der Arbeit wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es war nicht auszuschließen, dass Lösungsmethoden bereits vorhanden waren. Die Literaturrecherche ergab zwar einige Lösungsmethoden, diese waren aber entweder schlecht anwendbar, oder nicht ganz kongruent mit den hydraulischen Randbedingungen des Schachtbrunnens. Aus diesem Sukkus ergab sich die Planung von physikalischen Modellversuchen. Durch diese sollte eine Datengrundlage zur konkreten Lösung der Aufgabenstellung generiert werden. Durch ein physikalische Modell (Brunnenmodell) erhielt man sowohl Angabe als auch Lösung der Aufgabenstellung.

Nach der erfolgreichen Adaptierung eines bestehenden Brunnenmodells, welches sich im wasserbaulichen Labor des Departments für Wasser-Atmosphäre-Umwelt der Universität für Bodenkultur Wien befindet, wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Dabei stellen die ersten beiden Versuchsreihen einen stationären Pumpversuch in einem ungespannten Aquifer mit zwei verschiedenen Böden dar. Die dritte Versuchsreihe bestand aus einem Recoverytest.

Ziel der Auswertung eines Pumpversuchs ist die Berechnung der hydraulischen Parameter im Brunneneinzugsgebiet. Im hier vorliegenden speziellen Fall lieferte die Pumpversuchsauswertung die Durchsatzrate (k_s -Wert) des um den Brunnen befindlichen Bodenmaterials. Diese ist ausschlaggebend für die an die Pumpversuchsauswertung anschließende Dimensionierung eines Schachtbrunnens im Feld.

Die Auswertung gliederte sich in die Anwendung verschiedener Lösungsansätze

- Erstellung von Potenzialnetzen für die durchgeführten Versuche um das Strömungsbild um den Brunnen charakterisieren zu können.
- Analyse der Pumpversuchsdaten mit dem Ziel der Herleitung eines Zusammenhanges zwischen geometrischen und hydraulischen Parametern.
- Berechnung der Soll-Durchsatzrate (k_s -Wert) mit einer Vielzahl von vorhandenen, aber die gegebenen Randbedingungen nicht optimal erfüllenden, Brunnenformeln.
- Numerische Strömungssimulation mit der Software Hydrus 2D und PMWIN. Mit diesen Programmen kann eine bessere Anpassung an die Randbedingungen eines konkreten Pumpversuchs erreicht werden.

2 theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden einerseits die Grundlagen zum Aufbau und der Wirkungsweise von Schachtbrunnen, sowie das theoretische Konzept der Wasserbewegung in einem porösen Medium, dargestellt und erläutert werden.

2.1 Das poröse Medium

Ein poröses Medium (ausschließlich im festen Aggregatzustand) ist bei Betrachtung eines definierten Kontrollvolumens (hier makroskopische Betrachtung) dadurch definiert, dass der Kontrollraum volumetrisch betrachtet nicht nur vom porösen Medium selbst erfüllt ist, sondern auch über einen Hohlraum (Porenraum) verfügt (Formel 1). Des Weiteren muss es sich bei einem porösen Medium nicht zwingend um ein homogenes und isotropes Material handeln. Es ist durchaus möglich, dass es sich um ein Konglomerat verschiedenster fester Materialien handelt. Das poröse Medium kann außerdem nicht nur aus einem Körper, sondern auch, in Bezug auf den makroskopischen Betrachtungsmaßstab, aus mehreren Körpern bestehen. (Luckner und Shestakov, 1986)

Der Boden repräsentiert ein poröses Medium, welcher in physikalischer Betrachtung auch als ein Mehrphasensystem betrachtet werden kann. Böden bestehen aus einer festen Phase (Korngerüst) und einem Porenvolumen (flüssige und gasförmige Phase) (Formel 2 und 3). Die Eigenschaften des Mehrphasensystems „Boden“ werden durch Parameter beschrieben (Luckner und Shestakov, 1986). Speziell für diese Arbeit sind Parameter, die Strömungsprozesse (Wasserbewegung) und Speicherprozesse im porösen Medium beschreiben, von vorrangiger Bedeutung.

$$V_{ges} = V_p + V_s$$

Formel 1: Zusammensetzung des Bodenvolumens

$$V_p = V_a + V_l$$

Formel 2: Zusammensetzung des Porenvolumens

$$n = \frac{V_p}{V_{ges}}$$

Formel 3: Porenanteil

V_{ges}	in m ³	Gesamtvolumen (in der Regel ein definiertes repräsentatives Gesamtvolumen)
V_p	in m ³	Porenvolumen
V_s	in m ³	Feststoffvolumen des porösen Mediums
V_a	in m ³	Porenvolumen, das mit Luft gefüllt ist
V_l	in m ³	Porenvolumen, das mit einem Fluid (Wasser) gefüllt ist
n		Porenanteil
a		air

l	liquid
s	solid

2.2 Grundwasser

Grundwasser kann als jenes Wasser definiert werden, dass sich unterhalb der Geländeoberkante in einem gesättigten porösen Medium befindet (Bear und Verruijt, 1987). Es bewegt sich nur auf Grund der Gravitation bzw. eines vorhandenen Gefälles (Bieske et al., 1998). Da der Untergrund keineswegs homogen und isotrop ist, gelangt das versickernde Perkolat irgendwann an einen Bodenhorizont, der eine Weiterversickerung derart erschwert, dass es zu einer Stauung des Versickerungswassers kommt. Solche geologischen Einheiten werden Grundwasserstauer bzw. Aquiclude genannt (Kruseman et al., 1991). Es ist zu beachten, dass die Lage und Neigung der Aquiclude sehr vielfältig sein kann und keineswegs immer eine horizontale Ebene darstellt. Abhängig von der zuströmenden Wassermenge sowie der regionalen Geologie stellt sich ein Grundwasserspiegel ein, dessen höhenmäßige Lage starken Schwankungen unterworfen sein kann (z.B. durch anthropogene Grundwassernutzung, Klima, regionale Geologie). Es ist zu beachten, dass die Lage des Grundwasserspiegels (bei freiem Grundwasser: Außendruck gleich Atmosphärendruck (Höltling, 1980)) im Allgemeinen nicht durch eine ebene Fläche gegeben ist.

Jene geologischen Horizonte, in denen das Grundwasser aufgestaut bzw. gespeichert wird und welche ein gewisses Maß an Wasserbewegung erlauben, werden als Grundwasserleiter bzw. Aquifere bezeichnet. Aquifere und Aquicluden können auch vielfältig übereinander angeordnet sein. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, dass über einem Aquifer eine Aquiclude liegt und Wasser nur seitlich oder von unten zuströmen kann. Der Grundwasserspiegel kann lagemäßig nach oben beschränkt sein, somit kann der Grundwasserkörper unter zusätzlichem Druck stehen. Herrschen solche Verhältnisse spricht man von gespanntem Grundwasser. Ist der Aquifer nur der freien Atmosphäre ausgesetzt herrschen an der Grundwasseroberfläche atmosphärische Druckverhältnisse. Ist dies gegeben, spricht man von einem ungespannten Aquifer. In einem solchen bildet sich der Grundwasserspiegel frei aus (Kruseman et al., 1991).

Der Grundwasserkörper stellt einen Speicher dar und als ein solcher wird dieser auch genutzt. Auch der Mensch nutzt diesen Speicher, z.B. zur Deckung seines Wasserbedarfs.

2.3 Grundwasserbewirtschaftung - Schachtbrunnen

Ein Schachtbrunnen (Abbildung 1) stellt die technisch älteste Einrichtung zur Fassung von Grundwasser dar (Bieske, 1965). Der Brunnentyp „Schachtbrunnen“ zählt zu den unvollkommenen Brunnen. Das bedeutet, dass dieser nicht die gesamte Aquifermächtigkeit durchdringt. Die Tiefe der Abteufung des Brunnenschachtes orientiert sich natürlich primär an der geplanten Fördermenge. Bei Vergleich mit anderen Brunnentypen ist der Schachtbrunnen als Typ mit relativ geringer Eindringtiefe in den Aquifer einzuordnen. Er charakterisiert sich weiter dadurch, dass das Verhältnis von Schachtdurchmesser zu Schachttiefe im Vergleich zu anderen Brunnentypen relativ groß ist. In dieser Arbeit wird jene Art des Schachtbrunnens behandelt, dessen Brunnenwand als technisch dicht angesehen werden kann. Aus dieser Definition ergibt sich das dritte wesentliche Charakteristikum des Schachtbrunnens. Da das Grundwasser nicht über die Brunnenwand (Mantelfläche) in den Brunnenschacht eindringen kann, erfolgt die Einströmung in den Brunnen ausschließlich über die poröse Brunnensohle (Bieske et al., 1998).

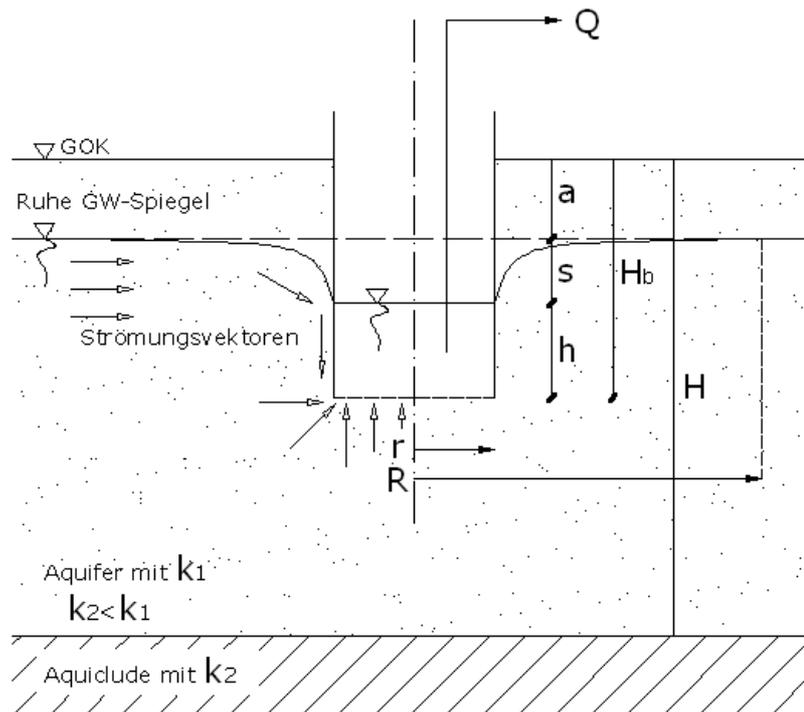


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Schachtbrunnens

Q	in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Förderrate
a	in m	Abstich (Differenz zwischen Geländeoberkante und Lages des ruhenden Grundwasserspiegels)
s	in m	Lage des aktuellen Grundwasserspiegels relativ zum ruhenden Grundwasserspiegel (Absenkung)
h	in m	aktueller Wasserstand im Brunnen
H_b	in m	Brunnentiefe
H	in m	Mächtigkeit des Aquifers
r	in m	Brunnenradius
R	in m	Radius des Absenktrichters; induziert durch Förderrate
k_i	in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	jeweilige Durchsatsrate des Bodenhorizonts

2.4 Der Pumpversuch

Bei einem Pumpversuch wird Wasser aus einem Brunnen entnommen. Durch die Wasserentnahme (Pumprate) kommt es im Brunnen zu einer temporär bedingten höhenmäßigen Veränderung des Wasserspiegels (Absenkung). Die Höhe der Absenkung ist abhängig von hydraulischen und geometrischen Parametern, sowie der Pumprate. Während des Pumpversuchs werden die Höhe der Pumprate und die sich dabei einstellende Absenkung zeitlich kontinuierlich oder diskret erfasst. Ziel des Pumpversuchs ist die Schaffung einer Datengrundlage, mit welcher die zuvor unbekanntes hydraulischen Parameter des Aquifers abgeschätzt werden können. Die Abschätzung der Parameter erfolgt über die Aufstellung eines Modells oder Gesetzes, dass die

Wasserbewegung im Untergrund beschreibt. Nach erfolgreicher Auswertung der Pumpversuchsdaten kann ein Brunnen, der eine definierte Menge an Wasser nachhaltig fördern soll, entsprechend den regionalen Gegebenheiten dimensioniert werden (Bieske et al., 1998).

Man unterscheidet mehrere Arten von Pumpversuchen (z.B. Brunnentest, Recoverytest, Aquifertest, Leistungspumpversuch, Stufenpumpversuch). Generell kann man Pumpversuche aber in zwei Arten gliedern, nämlich Stationärversuche (Beharrungszustand der Potenzialhöhen erreicht) und Instationärversuche (Beharrungszustand nicht erreicht). Ein stationärer Zustand einer Größe (z.B. Förderrate, Absenkung) ist durch seine an einem fixierten Punkt (Ort) gemessene zeitliche Konstanz definiert. Bei einem instationären Zustand ist diese Größe zeitlich variabel (Bieske et al., 1998).

2.5 Mathematische Beschreibung von Strömungsprozessen in porösen Medien

Strömungsprozesse in einem porösen Medium laufen innerhalb des Porenvolumens ab. Dabei spielen wiederum nur jene Poren eine Rolle, die mit einander verbunden sind und so einen Strömungspfad generieren (effektive Porosität). Abhängig von der effektiven Porosität, dem Sättigungsgrad des porösen Mediums und der Querschnittsfläche der Porenkanäle normal zur Fließrichtung ergeben sich stark abweichende potentielle Strömungsgeschwindigkeiten. Neben den Eigenschaften des porösen Mediums und des strömenden Fluides, sind auch die lokal wirkenden äußeren Druckkräfte ausschlaggebend für das Strömungsgeschehen im Porenraum.

Da die mathematische Beschreibung für die Zuströmung zu einem Schachtbrunnen in Zylinderkoordinaten geschrieben wird (ein Brunnen samt Einzugsgebiet kann vereinfacht als ein rotationssymmetrisches System dargestellt werden), sind alle nachfolgenden Formeln in Zylinderkoordinaten angeschrieben. Für das Zylinderkoordinatensystem ergeben sich folgende Bedingungen.

$$r \geq 0, \quad \theta = 2\pi, \quad -\infty < z < \infty$$

Formel 4: Definition der Zylinderkoordinaten

r in m Zylinderradius
θ in ° Segmentwinkel des Zylinders
z in m Zylinderhöhe

(Spiegel und Michel, 1977)

2.5.1 Gesetz von Darcy

Der Strömungswiderstand durch das Porennetzwerk eines Aquifers kann über das Gesetz von Darcy beschrieben werden (Hölting, 1980). Darcy gelangte zu der Erkenntnis, dass der Durchfluss durch ein poröses Medium proportional dem dabei erfahrenen Druckverlust ist. Außerdem ist der Durchfluss umgekehrt proportional zur Länge des durchströmten Mediums und in linearer Beziehung mit dem Durchflussquerschnitt (Bear 1987). Dieses Gesetz ist jedoch nicht allgemein gültig. Das Gesetz von Darcy gilt nur für Fluidströmungen (hier newton'sches Fluid (Wasser)) bei einer Reynoldszahl bis zehn (Verruijt, 1982) bzw. solange der Strömungszustand laminar ist (Hillel, 1998). Da die Strömungsgeschwindigkeiten im Grundwasser generell niedrig sind, treten Reynoldszahlen deutlich über zehn nur in unmittelbaren Quell- und Senkenbereichen bzw. an

Grenzschichten auf. Solche Bereiche können z.B. durch die Absenkung des Wasserspiegels in einem Brunnen entstehen.

$$v = -k_{r,\theta,z} \frac{\partial H}{\partial s}$$

Formel 5: Gesetz von Darcy

v	in m*s ⁻¹	Fließgeschwindigkeit
k _{r,θ,z}	in m*s ⁻¹	Durchsatzrate
H	in m	Potenzialhöhe
s	in m	Länge des ebenen Fließweges durch den Probenkörper

Da im Feld meist inhomogene ($k = f(r)$) Verhältnisse herrschen, stellt eine ermittelte Durchsatzrate nur einen räumlich integrierten, anisotropen ($k = f(r, \theta, z)$) Parameter dar. Da die Auswertung von Feldverhältnissen sehr komplex ist, werden nachfolgend isotrope und homogene Verhältnisse angenommen.

$$\frac{\partial k_{r,\theta,z}}{\partial(r, \theta, z)} = 0$$

Formel 6: Definition der Durchsatzrate als isotrop und homogen

k _{r,θ,z}	in m*s ⁻¹	Durchsatzrate
--------------------	----------------------	---------------

2.5.2 Massenbilanz und Kontinuität

Um den Fluss durch ein poröses Medium beschreiben zu können ist es sinnvoll ein Kontrollvolumen (hier Zylinder) in einen makroskopischen Maßstab zu definieren. Da sich diese Arbeit vorrangig mit stationären Zuständen beschäftigt, kann die Betrachtung von Speichervorgängen im porösen Medium vernachlässigt werden. Außerdem kann die Dichte des strömenden Fluides (Grundwasser) bei ungespannten Verhältnissen als konstant angenommen werden (Verruijt, 1982).

$$\nabla \cdot q = \frac{\partial q}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial \theta} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0$$

Formel 7: Massenbilanz bei stationären Verhältnissen

∇		Nabla-Operator mit $\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z}$
q	in m*s ⁻¹	spezifischer Fluss
r	in m	Radius (horizontale Komponente)
θ	in °	Segmentwinkel
z	in m	vertikale Komponente

(Spiegel, 1990)

2.5.3 Potenzialtheorie

Die Potenzialtheorie kann die äußeren Kräfte, die auf ein Fluid in einem porösen Medium wirken, durch ein konservatives (wirbelfreies) Kraftfeld beschreiben. Die Wirbelfreiheit ist gegeben, wenn

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0$$

Formel 8: Definition eines konservativen (wirbelfreien) Kraftfeldes

gilt (Nahrgang, 1954).

Die Potenzialtheorie dient hier zur Beschreibung einer Potenzialströmung. Innerhalb eines definierten Bereiches (Aquifer, in dessen Zentrum ein Brunnen steht) wird eine Potenzialströmung durch die äußeren Ränder des Strömungsgebietes (Randbedingungen) bestimmt. Durch diesen Ansatz kann eine Lösung für die Beschreibung des Strömungsgeschehens innerhalb eines definierten Bereichs gefunden werden (Nahrgang, 1954).

Aus der Summe der äußeren Kräfte resultiert das Gesamtpotenzial.

$$H_{r,\theta,z} = z + \frac{p_{r,\theta,z}}{\rho g} + \frac{v_{r,\theta,z}^2}{2g}$$

Formel 9: Bernoulli-Gleichung in Zylinderkoordinaten

H	in m	Gesamtpotenzial
z	in m	geodätische Höhe
p	in N*m ⁻²	lokaler Druck
ρ	in kg*m ⁻³	Fluiddichte
g	in m*s ⁻²	Gravitationskonstante
v	in m*s ⁻¹	Fließgeschwindigkeit
r, z, θ	in m, m, °	Zylinderkoordinaten

Da die Fließgeschwindigkeiten im Aquifer sehr klein sind, kann die Geschwindigkeitshöhe vernachlässigt werden. Die Potenzialhöhe H beschreibt die an einem Punkt vorliegende Gesamtenergiehöhe. Da die Gesamtenergiehöhe von lokalen Gegebenheiten abhängig ist, kann diese im betrachteten Raum (Aquifer) starken Schwankungen unterliegen. Existiert zwischen zwei lokalen Punkten eine Potenzialhöhendifferenz (Potenzialgradient), kommt es zu einer Ausgleichsbewegung des Fluides (Fluss vom höheren zum niedrigeren Potenzial). Verfügt der betrachtete Raum jedoch über ein konstantes Potenzial, verharrt dieser in einem Ruhezustand.

$$\frac{\partial H_{r,\theta,z}}{\partial (r, \theta, z)} = \text{grad } H_{r,\theta,z} = \nabla H_{r,\theta,z} = \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \theta} + \frac{\partial H}{\partial z}$$

Formel 10: Potenzialgradient in Zylinderkoordinaten

∇H(r, θ, z)	m*m ⁻¹	Gradient des Gesamtpotenzials
r, z, θ	in m, m, °	Zylinderkoordinaten

(Spiegel, 1990)

Ist selbst der Gradient einer räumlichen oder zeitlichen Veränderung unterworfen, spricht man von der Divergenz. Kommt es zu einer Beeinflussung der Kontinuität (Quelle oder Senke) in einem Kontrollvolumen wird die Divergenz ungleich Null. Bei einer Entnahme wird sie negativ und bei einer Zugabe positiv.

$$\nabla^2 H_{r,\theta,z} = \text{div } H_{r,\theta,z} = \nabla \cdot \text{grad } H_{r,\theta,z} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r \nabla H) + \frac{\partial \nabla H}{\partial \theta} + \frac{\partial \nabla H}{\partial z} \right]$$

Formel 11: Divergenz des Gesamtpotenzials

$\nabla^2 H_{r,\theta,z}$ in m^{-1} Divergenz des Gesamtpotenzials

r, z, θ in $\text{m}, \text{m}, ^\circ$ Zylinderkoordinaten

(Spiegel, 1990)

Potenzial- und Stromfunktion

Verbindet man alle Punkte gleichen Potenzials erhält man innerhalb des betrachteten Raums (Zylinder) Äquipotenzialflächen, welche geschnitten mit der Strömungsebene Äquipotenziallinien darstellen. Den Weg, den ein Flüssigkeitsteilchen innerhalb des betrachteten Raums zurücklegt, wird durch eine Stromlinie (beim Schnitt durch die Strömungsebene) beschrieben. Durch die Integration einer Stromlinie über die Strömungsebene erhält man eine Stromfläche. Die Ausbildung einer Stromlinie erfolgt nach dem Prinzip der Verfolgung jenes Weges, mit dem ein maximaler Gradient überwunden werden kann. Durch diese Definition ergibt sich, dass Stromlinien auf Potenziellinien normal stehen. Daraus ergibt sich eine mathematische Beschreibung für den Zusammenhang zwischen Stromfunktion (Beschreibung der Stromlinie) und Potenzialfunktion (Beschreibung der Potenziellinie).

Stellt man sich ein rotationssymmetrisches Strömungsgebiet mit dem Öffnungswinkel θ vor, in dem eine ebene Strömung parallel der Achse r fließt und die Potenziale normal dazu parallel auf der Achse z verlaufen, können die Strom- und Potenzialfunktion folgendermaßen ausgedrückt werden (Nahrgang, 1954).

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = v_r = q, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$

Formel 12: Stromfunktion

$$\Phi = f(H), \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial r} \neq 0$$

Formel 13: Potenzialfunktion

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \theta r \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z}$$

Formel 14: Zusammenhang von Strom- und Potenzialfunktion

Φ in m Potenzialfunktion

φ in $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Stromfunktion

q	in $m \cdot s^{-1}$	spezifischer Fluss
H	in m	Gesamtpotenzial

2.5.4 Rotationssystemmetrische Zuströmung zu einem Brunnen

Stellt man sich einen Brunnen inmitten eines ungespannten Aquifers vor, entsteht bei der Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen eine Potenzialdifferenz zwischen dem Wasserspiegel im Brunnen und dem ruhenden Grundwasserspiegel im Aquifer. Zum Ausgleich der Potenzialdifferenz kommt es zum Einsetzen einer Ausgleichsströmung in Richtung des relativ niedrigeren Potenzials. Ist der Brunnen von allen Seiten vom Aquifer umgeben, entsteht bei der Ausgleichsströmung, abhängig von den hydraulischen Parametern des Aquifers, ein Absenktrichter. Betrachtet man hingegen nur ein Segment des Brunnens mit dessen radial anliegendem Aquifer, ist es naheliegend, dass die Strömung in diesem einen Segment auch der Strömung in den übrigen Segmenten entspricht. Aus diesem Ansatz kann ein Brunnen, unter Annahme eines homogenen und isotropen Aquifers, als rotationssystemmetrisch betrachtet werden.

$$\frac{\partial^2(h^2)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(h^2)}{\partial r} = 0$$

Formel 15: Laplace-Gleichung in Zylinderkoordinaten

mit $h = H - s$

mit der Lösung

$$h^2 = A \ln r + B$$

Formel 16: Lösung der Laplace-Gleichung in Zylinderkoordinaten

A,B Konstanten

Die Konstanten A und B müssen durch Anfangs- und Randbedingungen festgelegt werden (Verruijt, 1982).

Anfangs- und Randbedingungen

Um eine Differenzialgleichung 2. Ordnung numerisch zu lösen bedarf es der Angabe von Anfangs- und Randbedingungen. Diese umgeben das durch eine Differenzialgleichung beschriebene Feld und stellen Punkte mit bekannten Lösungen dar. Im Fall des Pumpversuchs bei einem Schachtbrunnen ergeben sich Randbedingungen durch Randstromlinien, Randpotenziallinien und Randstromlinien in Form einer freien Sickerstrecke (freier Grundwasserspiegel bzw. Druckhöhe entspricht dem Atmosphärendruck). In dieser Arbeit werden vorwiegend stationäre Bedingungen untersucht ($t=T$), daher gilt für die zeitlichen Randbedingungen

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{wenn } t = T.$$

Formel 17: Definition des stationären Gesamtpotenzials

H	in m	Gesamtpotenzial
t	in s	Betrachtungszeitpunkt, $t > 0$, bei dem stationäre Zustände vorliegen

T in s Endzeitpunkt, $t=T$, Betrachtungszeitpunkt entspricht dem Endzeitpunkt, an dem sich stationäre Bedingungen eingestellt haben.

Für den stationären Zustand gelten geometrische und hydraulische Randbedingungen.

Eine Randpotenziallinie gibt einen Bereich konstanten Potentials z.B. in Form eines Oberflächenwassers an (Dirichlet-Randbedingung)

$H = konst.$ Äquipotenziallinie bzw. Randpotenziallinie

Formel 18: Randpotenziallinie

Eine Randstromlinie gibt an, dass es keinen Fluss normal zu ihr gibt. Sie definiert eine Strömungsrichtung entlang einer Ebene (Neumann-Randbedingung).

$\frac{d\varphi}{dr} = 0$ oder $\frac{d\varphi}{dz} = 0$ Randstromlinie

Formel 19: Randstromlinie

In einem ungespannten Aquifer unterliegt die Lage des freien Wasserspiegels äußeren Einflüssen (z.B. aktiver Brunnen). Der Wasserspiegel kann einerseits als sich lagemäßig verändernde Randstromlinie gesehen werden, andererseits auch als freie Sickerlinie. Der freie Wasserspiegel bildet vereinfacht gesehen die Grenzschicht zur Atmosphäre. Daher herrscht an der Oberfläche des freien Wasserspiegels Atmosphärendruck. Dieser bewirkt, dass das Gesamtpotenzial allein durch das Lagepotenzial beschrieben werden kann.

$H_{z,r} = z$ Sickerlinie

Formel 20: Sickerlinie

(Bear, 1987)

3 Physisches Brunnenmodell

Um die Hintergründe bei einem Pumpversuch von einem Schachtbrunnen aufdecken zu können, ist es von Vorteil, bereits vor der Analyse bzw. Auswertung, das Ergebnis zu kennen. Solch eine redundante Datengrundlage kann durch ein Labormodell generiert werden. Zu diesem Zweck wurde im Wasserbaulabor der Universität für Bodenkultur Wien ein Brunnenmodell in Betrieb genommen.

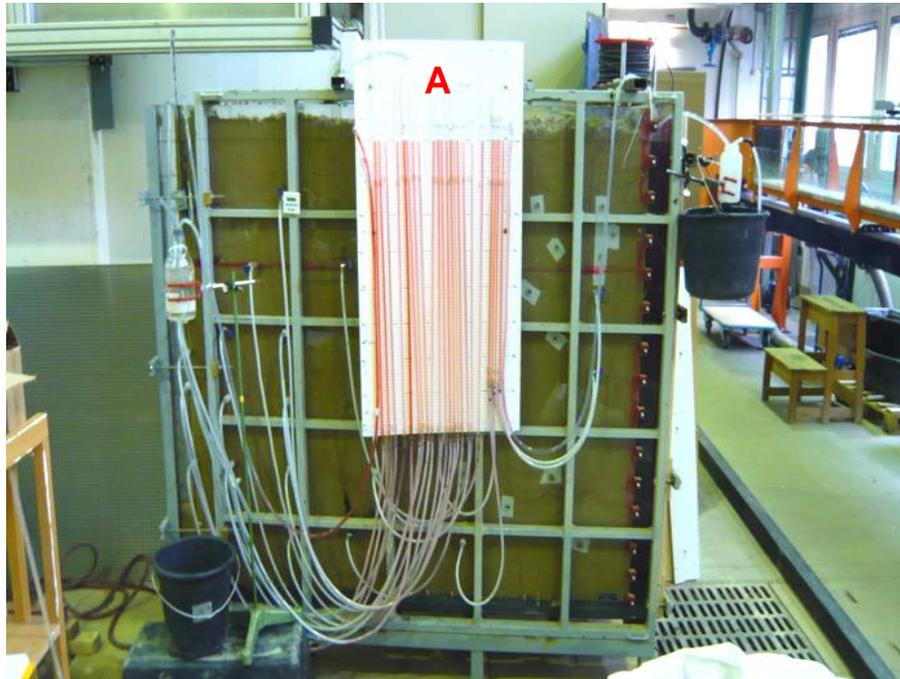


Abbildung 2: Brunnenmodell vor Versuchsbeginn mit gleichen Potenzialhöhen in allen Messpunkten

3.1 Modellinstandsetzung

Ein Konzept über den Bau eines Brunnenmodells war auf Grund eines vorhandenen Modells nicht notwendig. Es galt jedoch das bestehende Modell insoweit zu adaptieren, dass es den Gegebenheiten bei einem Schachtbrunnenpumpversuch entspricht. Die Arbeitsschritte des Umbaus gliederten sich in die Adaptierung von

- Messnetz
- Randbedingungen
- Versuchsablauf

Das Brunnenmodell hat die Gestalt eines Tortenecks bzw. Zylindersegments, da auf Grund des rotationssymmetrischen Strömungsansatzes kein kompletter Brunnen (inkl. ihn umgebenden Boden) nötig ist. Die Messergebnisse des Segments können auf den kompletten Brunnenquerschnitt umgerechnet werden. Das Brunnenmodell verfügte über einen Winkel von 15°.

3.2 Messnetz

Das Messnetz diente zur Erfassung der Potenzialhöhen in verschiedenen Punkten des um den Brunnen liegenden Bodenkörpers. Die Messung erfolgte analog und kontinuierlich über eine Messharfe (Abbildung 2, Bereich um A). Da davon auszugehen war, dass die Potenzialhöhen am stärksten im unmittelbaren Wassereintrittsbereich des Schachtbrunnens (Brunnensohle) variieren, wurden die Messpunkte im Bereich des Brunnens konzentriert. Mit zunehmender Entfernung vom Brunnen verringerte sich die Anzahl der Messpunkte. Insgesamt wurden, einschließlich je eines Messpunktes im Brunnenschacht und einem im ruhenden Grundwasser (äußere Randbedingung), 23 Messpunkte eingebaut.

Die Messung einer Potenzialhöhe erfolgte über ein im Bodenkörper eingebrachtes Rohr. Der unmittelbare Kontakt mit der Bodenmatrix wurde über ein Filterplättchen, welches sich am Ende des Rohrs befand, sichergestellt. Somit konnte nicht nur die Messung von Matrixpotenzialen gewährleistet werden, sondern auch der Eintrag von Bodenmaterial in das Messsystem verhindert werden. Je nach höhenmäßiger Lage des Messpunktes wurden Filterplättchen verschiedener Porosität verwendet. Punkte, die nahe an der zu erwartenden freien Sickerlinie lagen, wurden mit einem Filterplättchen höherer Porosität (Porosität 3) ausgestattet. So konnte die Lage des freien Wasserspiegels genauer ermittelt werden.

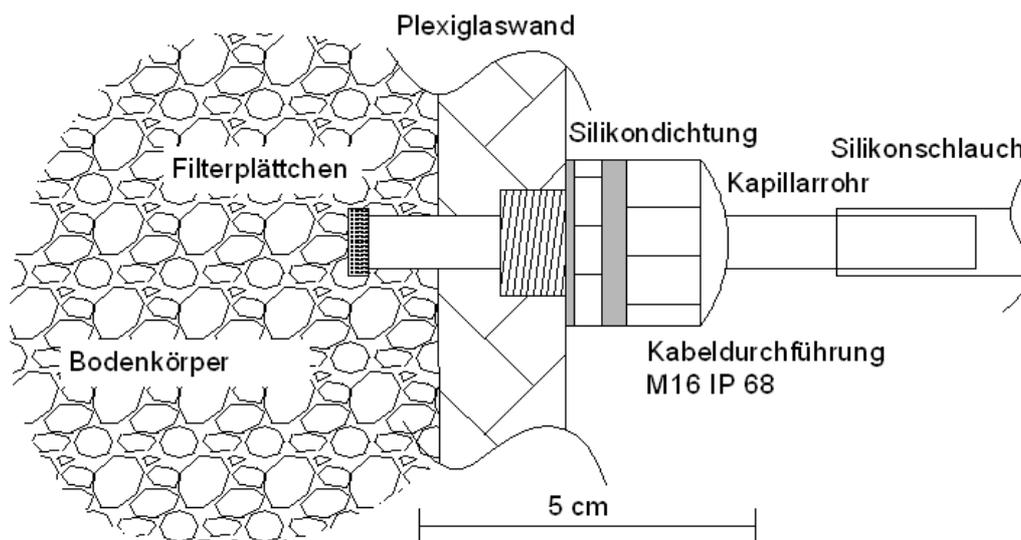


Abbildung 3: Aufbau der Messpunkte im Schnitt durch die Außenwand des Brunnenmodells

3.2.1 Randbedingungen

Die Gewährleistung der Randbedingungen im Brunnenmodell stellte sich als äußerst komplex heraus. Speziell die Herstellung einer dichten Brunnenwand war mit hohem zeitlichem Aufwand verbunden. Es galt drei verschiedene Randbedingungen herzustellen.

- Randstromlinie
- Randpotenziallinie
- freie Oberfläche

Nachfolgend wird die Lage der Randbedingungen, welche auch der Abbildung 5 entnommen werden können, beschrieben.

Die Randstromlinien bei einem Schachtbrunnenpumpversuch befinden sich an der dichten Brunnenwand, am inneren Rand des Modells zwischen Brunnensohle und Aquiclude (Rotationssymmetrielinie des Brunnenmittelpunktes) und am Übergang zwischen Aquifer und Aquiclude. In punkto Gewährleistung der Randstromlinien mussten obige Bereiche technisch dicht gegenüber dem angrenzenden Außenbereich sein.

Die Randpotenziallinien, die auch als Äquipotenziallinie verstanden werden können, befinden sich an der horizontalen Unterkante des Brunnenschachtes (nach dem Durchtritt durch den Brunnenfilter) und am äußeren Rand des Brunnenmodells, welcher den freien ruhenden Grundwasserspiegel vorgibt. Der Brunnenfilter wurde derart aufgebaut, dass er einen niedrigeren Strömungswiderstand, als jener der im Bodenkörper vorhanden ist, aufweist. Die zweite Aufgabe des Brunnenfilters lag in der Abgrenzung des Bodenkörpers vom freien Grundwasserspiegel im Brunnen. Der Eintrag von Bodenmaterial sollte ausgeschlossen werden, damit der Brunnen nicht versandet.

Der Brunnenfilter (Mächtigkeit: 7 cm) wurde bündig mit der Brunnenwand über Schraubverbindungen (3 x M3) verbunden. Der Aufbau des Filters war vom Bodenkörper weglaufend wie folgt gegliedert:

- gelochtes Blech (0,2 cm)
- Filterschwamm (für Aquariumpumpe) (6 cm)
- gelochter Moosgummi (0,2 cm)
- gelochtes Blech (0,2 cm)
- Filtergaze (0,01 cm)
- gelochter Moosgummi (0,2 cm)

Damit das Bodenmaterial nicht durch den unmittelbaren Spitz des Brunnensegmentes (Brunnenachse) gespült wird, wurde dieser schlecht zugängliche Punkt zusätzlich mit Filterwatte verstärkt. Bei der Prüfung des Filterwiderstandes (reine Wasserfüllung des Modells) konnte bei einer konstanten Absenkung von 55 cm (Ausgangswasserspiegel auf einer Höhe von 117 cm) eine Pumprate von 530 ml pro sec. erreicht werden. Dieser Widerstand wurde, angesichts der erwarteten Pumpraten bei der eigentlichen Versuchsdruchführung, als ausreichend gering eingeschätzt.



Abbildung 4: Aufbau des Brunnenfilters

Aus Abbildung 4 geht auch der Aufbau der dichten Brunnenwand hervor. Die Außenwände des Brunnenmodells waren an der angedachten Lage der Brunnenwand mit einer Nut versehen. Die Brunnenwand inklusive Brunnenfilter wurde von oben in die Nut getrieben. Die Dichtung der Nut wurde über eine an die Brunnenwand angeklebte Silikondichtungsbahn (U-Profil) hergestellt. Da die Nut nur über eine Dicke von ca. 3,5 mm verfügte, musste die Brunnenwand aus einem sehr dünnen und daher gut biegsamen Stahlblech (0,7 x 32,5 mm) hergestellt werden. Um die Biegung bei der Einbringung der Brunnenwand so stark zu mindern, dass die Einbringung überhaupt möglich war, wurden beidseitig schmale aber dicke Stahlbleche (ca. 3 x 12 mm) zwischen den beiden Dichtungsbahnen angeschweißt.

Eine weitere Randpotenziallinie (eigentlich Äquipotenzialfläche) diente zur Abgrenzung des Bodenkörpers vom ruhenden Grundwasserspiegel (hintere Randbedingung). Diese Grenzschicht wurde über ein Lochblech, das mit einer Filtergaze überzogen war, hergestellt. Das Lochblech wurde über Schraubverbindungen im hinteren Teil des Brunnenmodells befestigt und erstreckte sich über die gesamte Modellhöhe (1,5 m) und hintere Modellbreite (60 cm).

Die freie Oberfläche bildet sich durch die Abflussverhältnisse im Modell selbstständig aus, somit kam es zu keinen speziellen baulichen Maßnahmen.

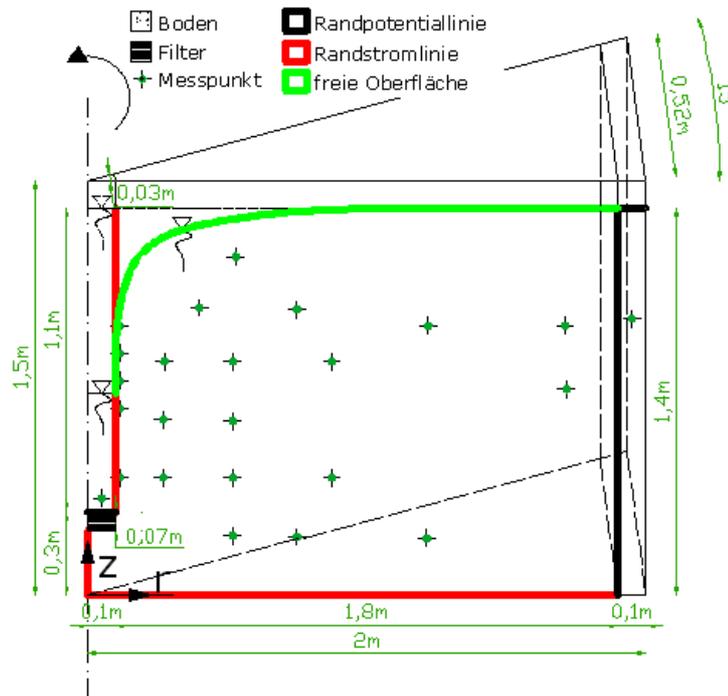


Abbildung 5: Brunnenmodell (Geometrie, Messnetz, Randbedingungen)

3.3 Bodenmaterial

Die Wahl der Kornabstufung des Bodenmaterials war an die Prämisse einer zielführenden Durchsatzrate geknüpft. Die Durchsatzrate des Bodens sollte im stationären Zustand eine messbare Absenkung im Bodenkörper bewirken. Auf der anderen Seite sollte die Durchsatzrate gut messbare und von einander klar abgrenzbare Durchflüsse ermöglichen. Durch den Vergleich von Forschungsarbeiten, die mit dem bestehenden Modell ähnliche Fragestellungen erörterten, konnte eine erste Zieldurchsatzrate sowie die Kornabstufung des Bodenmaterials bestimmt werden (Maleninsky, 1994, Kammerer, 1997). Die geplante Durchsatzrate bewegte sich im Bereich von $10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Da durch die Verwendung eines zweiten Bodentyps eine bessere Ausgangslage für die Auswertung erzielt werden konnte, wurde nach der ersten Versuchsreihe eine zweite Versuchsreihe mit einer vom ersten Bodentyp abweichenden Durchsatzrate durchgeführt. Der zweite Bodentyp wurde so ausgewählt, dass eine höhere Durchsatzrate und damit höhere Pumpraten erzielt werden konnten (ca. $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Um die Durchsatzrate als Zielgröße bei der Auswertung schon im Vorfeld zu charakterisieren, wurde diese durch Laborversuche ermittelt. Es wurden zwei Ansätze für die Ermittlung der Durchsatzrate im Labor verwendet. Dadurch konnten etwaige Fehler der Laborversuche aufgedeckt und korrigiert werden. Die Durchsatzrate wurde durch einen empirischen Ansatz von Hazen über die Ermittlung der Korngrößenverteilung und durch die Durchführung eines klassischen Darcy-Versuchs bestimmt.

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (dargestellt durch die Sieblinie) wurde der Kornbereich von 2 bis 0,063 mm über eine Nasssiebung und der Kornbereich von 0,063 bis $< 0,002 \text{ mm}$ über das Pipettierverfahren nach Kubiena bestimmt (ÖNORM L 1061-2, 2002).

3.3.1 Korngrößenverteilung

Die Versuchsdurchführung leitete sich von den Versuchsbeschreibungen des Institutes für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur ab, welche sich an den Vorgaben der ÖNORM L 1061-2 (2002) – Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden anlehnen.

Versuchsablauf und –aufbau

Bei der Nasssiebung wurde eine dispergierte Bodenprobe (100 g) durch einen Siebturm, unter dauernder Spülung mit Wasser, gerüttelt. Die Bodenrückstände der einzelnen Siebstufen wurden im Trockenschrank bei 106 °C getrocknet und gewogen. Durch die gewogenen Massen konnten die Massenanteile des Feinbodens bestimmt werden. Jene Probenanteile, die durch die Nasssiebung nicht erfasst wurden (Korngröße < 0,063 mm), konnten über das getrennt davon durchgeführte Pipettierverfahren nach Kubiena bestimmt werden. Beim Pipettierverfahren nach Kubiena (Probenmasse 20 g) wird die Sinkgeschwindigkeit der Körner mit deren Korndurchmesser, über das Gesetz nach Stokes, korreliert. Beim Versuch wurde, am Ende zeitlich vorgegebener Intervalle, eine Probe aus einer vorgegebenen Tiefe (10 cm unter Wasseroberfläche) des Absenkgefäßes entnommen. Diese Probe wurde im Trockenschrank bei 106 °C getrocknet und gewogen. Zur Minimierung der Fehler bei der Versuchsdurchführung wurden je Versuchsboden mindestens drei Proben angesetzt.

Sieblinie von Versuchsboden 1 (0,1-1 mm) und Versuchsboden 2 (0,7-1,2 mm)

Nachfolgend sind die Sieblinien, repräsentiert durch jeweils eine ausgewertete Probe, von Versuchsboden 1 und 2 dargestellt.

Versuchsboden	1	2
	0,1-1mm	0,7-1,2mm
repräsentiert durch Probe	Probe 1	K2a-6
d_k in mm	Fraktionsanteil in %	
2,000	100	100
1,000	100	75
0,630	100	9
0,200	65	2
0,125	30	2
0,063	9	1
0,002	0	0

Tabelle 1: Korngrößenverteilung von Versuchsboden 1 und 2

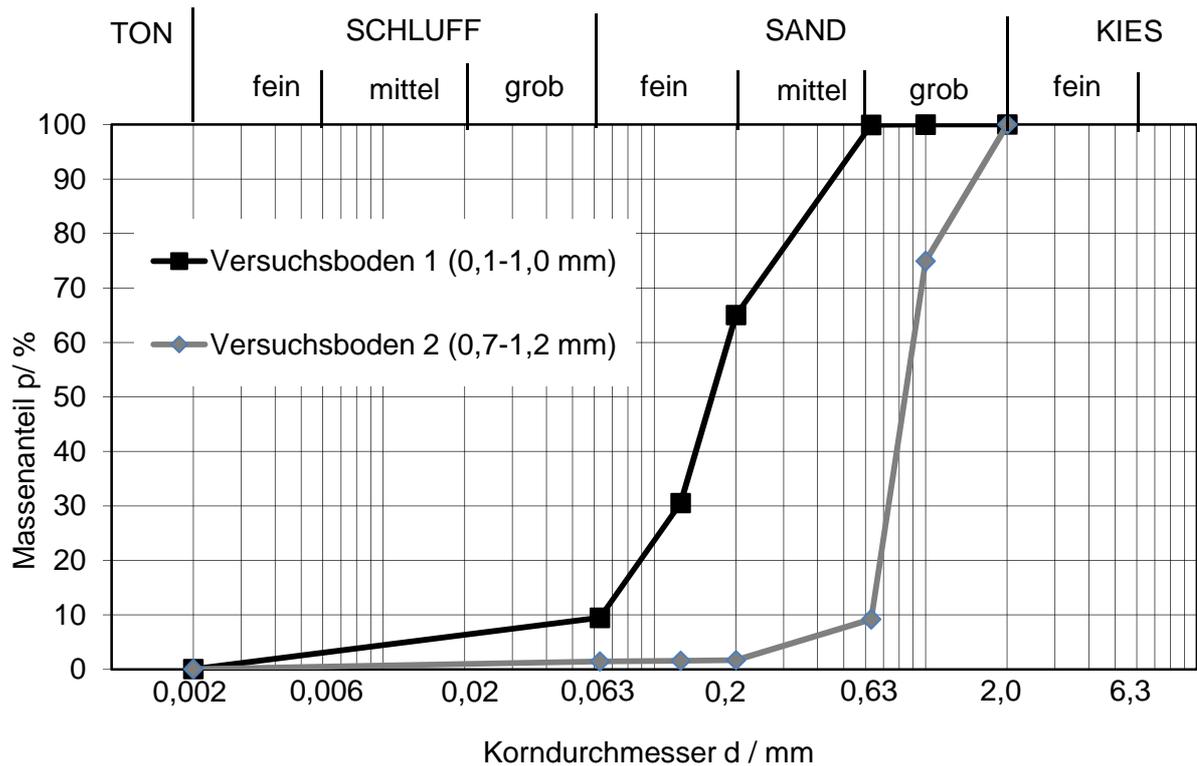


Abbildung 6: Korngrößenverteilung von Versuchsböden 1 und 2

3.3.2 Abschätzung der Durchsatzrate nach Hazen

Die Abschätzung der Durchsatzrate nach Hazen (1893) stellt einen empirischen Ansatz dar. Dieser gilt für Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl (U) kleiner 5 (Hölting, 1980).

$$k_s = 0,0116 * (d_{10})^2$$

Formel 21: Durchsatzrate nach Hazen (1893)

k_s in $m \cdot s^{-1}$ Durchsatzrate bzw. Durchlässigkeitsbeiwert

d_{10} in mm ~ wirksamer Korndurchmesser (d_w)

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Formel 22: Ungleichförmigkeitszahl

U Ungleichförmigkeitszahl

d_{60} Korngröße bei einem Massenanteil von 60% der Korngrößenverteilung

d_{10} Korngröße bei einem Massenanteil von 10% der Korngrößenverteilung

Versuchsboden	1	2
Kornabstufung	0,1 bis 1 mm	0,7 bis 1,2 mm
d ₁₀ in mm	0,06	0,6
d ₆₀ in mm	0,2	0,9
U	3,3	1,5
k_s in m*s⁻¹	4E-05	4E-03

Tabelle 2: Durchsatzrate nach Hazen (1893)

Da es sich bei Versuchsboden 1 um keinen gewaschenen Sand handelte, waren die Angaben des Verkäufers bezüglich des Korngrößenspektrums nicht ganz korrekt. Im Boden befand sich eine Schluff- bzw. Tonfraktion von insgesamt ca. 10 Massenprozent (Abbildung 6).

Der Versuchsboden 2 wurde erst nach Abschluss der Versuche mit Versuchsboden 1 angeschafft. Es galt die Ergebnisse der 1. Versuchsreihe abzuwarten um die Kornabstufung des zweiten Versuchsbodens, darauf aufbauend, abzustimmen. In Bezug auf die Qualität des Versuchsbodens 1 wurde diesmal ein gewaschener Quarzsand verwendet. Dieser war qualitativ hochwertiger, was sich vor allem im Preis niederschlug. Versuchsboden 2 verfügte über einen nichtigen Feinstkornanteil (Ton- oder Schluffanteile). Die Angaben des Verkäufers deckten sich zu 90 % mit der im Labor bestimmten Korngrößenverteilung. Der Fehlerbereich befand sich zwar wieder im entscheidenden unteren 10 % Bereich, die Durchsatzrate viel aber deutlich höher aus, als bei Versuchsboden 1.

3.3.3 Bestimmung der Durchsatzrate mittels Darcy-Versuch

Um die Ergebnisse des Ansatzes nach Hazen (1893) zu prüfen, wurde mit den beiden Versuchsböden ein Darcy-Versuch durchgeführt. Die dafür nötige Apparatur war (Dank eines früheren Studenten (Robert Maleninsky)) bereits vorhanden und konnte ohne großen Aufwand in Betrieb genommen werden (Abbildung 7).

Versuchsaufbau und -ablauf

Die in einem PE-Zylinder eingebaute gestörte Bodenprobe wurde vertikal von unten nach oben durchströmt. Ausgangspunkt für die eintretende Strömung war ein lagemäßig fixiertes Ausgangspotenzial bzw. Endpotenzial. Die Konstanz des Ausgangspotenzials bewerkstelligte ein Wasserkreislauf. Dabei wurde Wasser aus einem Kübel in ein Überlaufgefäß gepumpt. Das Überlaufgefäß war saugtechnisch über einen Silikonschlauch mit einem Trichter verbunden, der das Wasser in den PE-Zylinder einleitete. Im Bereich der eingebauten Bodenprobe verfügte der Zylinder über zwei analoge Druckmesspunkte (Standrohre). Auf diesen wurde der Druckverlust (Strömungswiderstand) in diskreten Zeitschritten abgelesen. Das den Bodenkörper durchströmende Wasser konnte auf Höhe des Endpotenzials frei überlaufen. Dieser Abfluss wurde über einen Messbecher gefasst und dessen Volumen gemessen. Für die Auswertung kam es zur zeitgleichen Erfassung von Abfluss und Druckverlust im PE-Zylinder. Über die Variation der Ausgangspotenzialhöhe konnte der Versuch mehrmals wiederholt werden.

Während des Darcy-Versuchs wurde eine gestörte Bodenprobe vertikal durchströmt. Beim Darcy-Versuch konnte angenommen werden, dass die eingebaute Bodenprobe (gestört, homogene Struktur, unkonsolidiert) homogene und isotrope Versuchsbedingungen gewährleistet. Ansonsten hätte durch den Darcy-Versuch nur die vertikale Durchsatzrate gemessen werden können.

Die durch den Darcy-Versuch ermittelte Durchsatzrate sollte als Zielwert bei der Pumpversuchsauswertung herangezogen werden können. Daher musste angenommen werden können, dass der Versuchsboden im Brunnenmodell als auch im Darcy-Versuch gleichwertig verarbeitet bzw. gelagert wurde. Diese Prämisse konnte unter folgenden Bedingungen angenommen werden:

- Gewährleistung isotroper Verhältnisse durch die kurze Lagerungsdauer der Versuchsböden in den beiden Apparaturen (Ausschluss von Konsolidierungseffekten, speziell sekundäre und tertiäre Setzungsprozesse)
- homogene, eng gestufte Struktur der Versuchsböden laut Korngrößenverteilung (Abbildung 6)
- Ausschluss von Skaleneffekten zwischen Darcy-Versuch und Brunnenmodell an Hand des Verhältnisses von Größtkorn der Versuchsböden zur Größe der Versuchsassparaturen



Abbildung 7: Darcy-Versuch (Versuchsboden 1)

Die Auswertung deckte sich mit dem klassischen Ansatz von Darcy.

$$k_s = \frac{Q}{A} * \frac{L}{\Delta H}$$

Formel 23: Formel nach Darcy

k_s	in $m^3 \cdot s^{-1}$	Durchsatzrate (Durchlässigkeitsbeiwert)
Q	in $m^3 \cdot s^{-1}$	Durchfluss
A	in m^2	Querschnittsfläche des Zylinders, 0,008659 m^2
L	in m	vertikale Strecke zwischen den Druckmesspunkten, 0,1 m
ΔH	in m	Druckdifferenz zwischen den zwei Druckmesspunkten

Versuchsboden 1

Versuch Nr.	Q	h ₁	h ₂	Δh	k _s
	($ml \cdot (10 \cdot min)^{-1}$)	(cm)	(cm)	(m)	($m^3 \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$)
1	310	18,6	8,4	10,2	7,1E-05
2	425	23,9	10,5	13,4	7,8E-05
3	460	28,1	12,1	16,0	7,3E-05
4	510	32,6	13,8	18,8	7,1E-05
5	530	32,5	14,0	18,5	7,3E-05
6	560	34,9	14,9	20,0	7,2E-05
k_{s,mittel}					7E-05

Tabelle 3: Durchsatzrate für Versuchsboden 1 mittels Darcy-Versuch

Da die Durchflüsse beim Darcy-Versuch bei Versuchsboden 2 nicht mehr über den Messbecher gefasst werden konnten, kam es zur Fassung des Durchflusses in einem Kübel und dessen Messung durch wägen.

Versuchsboden 2

ρ_w (kg*dm ⁻²)	0,999						
$m_{\text{Kübel}}$ (kg)	0,540						
Versuch Nr.	Q_{brutto}	Q	Q	h_1	h_2	Δh	k_s
	(kg*(3*min) ⁻¹)	(kg*(3*min) ⁻¹)	(ml*(10*min) ⁻¹)	(cm)	(cm)	(m)	(m ³ *(m ² *s) ⁻¹)
1	5,59	5,05	1,68	11,4	4,9	6,5	5,0E-03
2	6,34	5,80	1,93	12,7	5,0	7,7	4,8E-03
3	4,62	4,08	1,36	10,2	4,5	5,7	4,6E-03
4	7,03	6,49	2,16	15,0	5,7	9,3	4,5E-03
5	6,78	6,24	2,08	14,4	5,7	8,7	4,6E-03
6	6,05	5,51	1,83	13,2	5,3	7,9	4,5E-03
						$k_{s,\text{mittel}}$	5E-03

Tabelle 4: Durchsatzrate für Versuchsboden 2 mittels Darcy-Versuch

ρ_w in kg*dm⁻³ Wasserdichte

$m_{\text{Kübel}}$ in kg Masse des Kübels

Durch die Berechnung nach Hazen (1893) und Darcy (1856) konnte der Betrag der Durchsatzrate, als Ziel der Auswertung der danach erfolgten Pumpversuche, für beide Versuchsböden festgelegt werden. Die Berechnungsergebnisse wurden zusätzlich durch den Vergleich mit Werten aus der Literatur bestätigt (Hölting, 1980) (Tabelle 5).

	Bodenklassifikation laut ÖNORM B4400	Kornspektrum	Durchsatzrate ($k_{s,\text{mittel}}$)
Versuchsboden 1	SUE	0,1 bis 1 mm	7E-05 m*s⁻¹
Versuchsboden 2	SE	0,7 bis 1,2 mm	5E-03 m*s⁻¹

Tabelle 5: Übersicht zur Durchsatzrate der Versuchsböden (Hölting, 1980)

Da für die Durchsatzrate die Massenanteile für d_{10} sehr determinierend sind, verfügte Versuchsboden 1 über eine niedriger als erwartete Durchsatzrate (Hazen (1893) zit. in Hölting (1980)).

3.4 Methodik der Versuche am physischen Brunnenmodell

Die Versuchsreihen gliederten sich in drei Abschnitte

- stationärer Pumpversuch mit Versuchsboden 1
- stationärer Pumpversuch mit Versuchsboden 2
- instationärer Recoverytest mit Versuchsboden 2

3.4.1 stationärer Schachtbrunnenpumpversuch

Beim stationären Pumpversuch wurde bei konstantem GW-Spiegel (hintere Randbedingung) eine konstante Absenkung im Brunnenschacht hervorgerufen. Der Versuch galt als abgeschlossen, wenn sich die gemessene Förderhöhe und Potenzialverteilung, bei konstanten Randbedingungen, nicht mehr änderte. Zu diesem Zeitpunkt konnten stationäre Verhältnisse angenommen werden. Die Versuchsergebnisse wurden notiert und der Versuch, als erfolgreich abgeschlossen, bewertet. Der Versuch wurde mit einer Vielzahl von Absenkungen, jedoch immer mit dem gleichen Zuströmungspotenzial, mit beiden Versuchsböden durchgeführt. Die Höhe der Absenkung orientierte sich an der geometrischen Limitierung durch das Modell. Da der Brunnen über eine Tiefe von 110 cm verfügte, wurden die Höhen der Absenkung (5 Absenkstufen) mit 30 cm, 55 cm, 75 cm, 85 cm und 100 cm festgelegt. Um die Ergebnisse der Absenkstufen zu kontrollieren, kam es zu einer oftmaligen Versuchswiederholung.

Versuchsaufbau und –ablauf

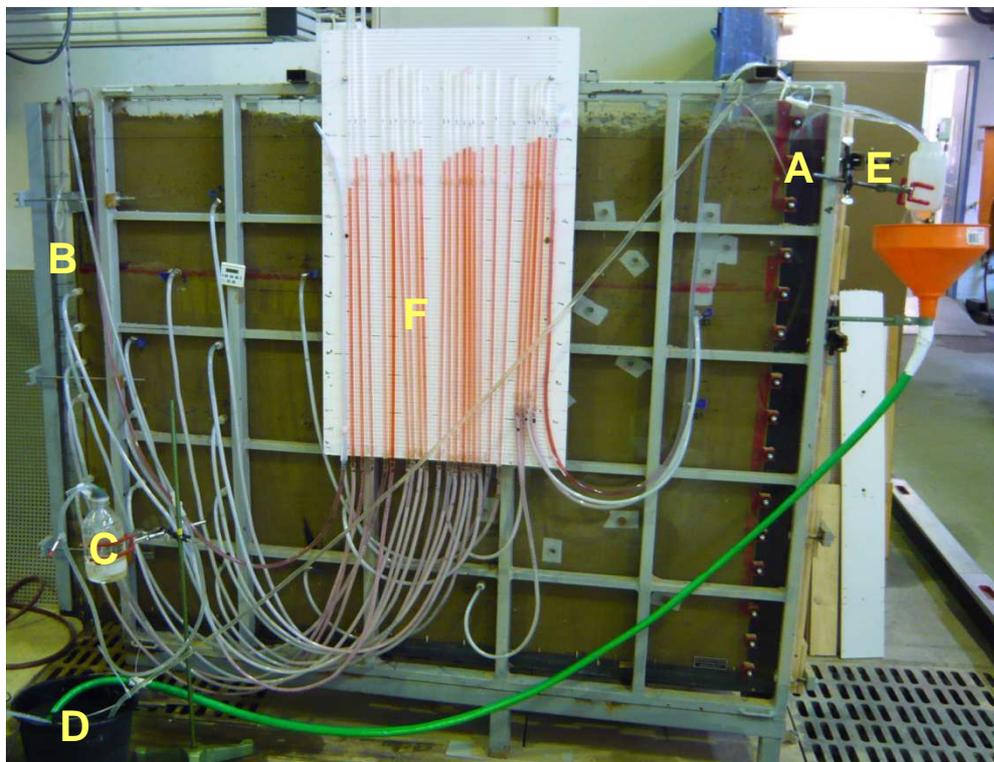


Abbildung 8: Brunnenmodell während eines Pumpversuchs (Versuchsboden 1)

Bei einem konstant gehalten Wasserspiegel (A) (Randpotenziallinie) wurde das gesättigte Bodenmaterial horizontal infiltriert. Dies geschah auf Grund einer im Brunnenschacht (B)

verursachten Absenkung (Senke). Die Absenkung wurde über die höhenmäßige Lage einer mit dem Wasserspiegel im Brunnenschacht kommunizierenden Abhebevorrichtung (C) (Shotflasche) fixiert. Der dabei geförderte, bis zum stationären Zustand variierende, Abfluss wurde in ein Speichergefäß (D) (Kübel) geleitet. In diesem befand sich eine Aquariumspumpe, die einen relativ konstanten Förderstrom in ein Überlaufgefäß (E) pumpte. Dieses befand sich in unmittelbarer Nähe zum Einströmungsbereich. Auf Grund der kommunizierenden Verbindung zwischen Überlaufgefäß und unbeeinflusstem Grundwasserspiegel (Silikonschlauch), konnte der unbeeinflusste Grundwasserspiegel konstant gehalten werden. Die Volumendifferenz zwischen dem Zustrom zum Überlaufgefäß und dem Kommunikationsstrom zwischen Überlaufgefäß und unbeeinflusstem Grundwasserspiegel wurde über einen Trichter in das Speichergefäß rückgeführt. Durch diesen Versuchsablauf konnten stationäre Randbedingungen angenommen werden. Konnte der stationäre Zustand als erreicht angenommen werden, wurde die Förderhöhe aus dem Brunnen über einen Messbecher erfasst und die dabei auftretende Potenzialverteilung (erfasst über eine Messharfe (F)) aufgezeichnet.

3.4.2 instationärer Recoverytest

Bei einem Recoverytest wird der instationäre Verlauf der Aufspiegelung des Wasserspiegels im Brunnenschacht erfasst. Ausgangspunkt für den Recoverytest ist eine zuvor hergestellte Absenkung bei stationären Verhältnissen. Während des Recoverytests kommt es einerseits zum Abbau des Potenzialgradienten zwischen Brunnen und umliegenden Boden, sowie zum Abbau des Potenzialgradienten im Boden selbst (Absenktrichter). Es ist zu beachten, dass es bei einem ungespannten Aquifer zu einer Wiederaufsättigung des Bodenkörpers kommt und somit die Aufspiegelungsgeschwindigkeit im Brunnen nur bei niedrigen Potenzialgradienten für die Auswertung herangezogen werden kann (Kruseman et al., 1991).

Versuchsaufbau und –ablauf

Stationäre Verhältnisse wurden durch einen davor stattfindenden stationären Schachtbrunnenpumpversuch hergestellt. Da der Recoverytest als letzte Versuchsmethode durchgeführt wurde und zu diesem Zeitpunkt das Modell mit Versuchsboden 2 gefüllt war, wurde der Versuch nur an Versuchsboden 2 durchgeführt. Der Versuch wurde bei gleicher Ausgangsabsenkung fünf Mal wiederholt. Zu Beginn des Versuchs wurde der stationäre Förderstrom des Pumpversuchs gemessen. Anschließend wurde der Zustrom zur Abhebevorrichtung gestoppt und die Aufspiegelung setzte ein. Die Kommunikation zwischen Überlaufgefäß und ruhendem Grundwasserspiegel wurde jedoch aufrecht erhalten. Mit dem Schließen der Zuströmung zur Abhebevorrichtung wurde eine Stoppuhr gestartet. Durch die Skalierung am Brunnenschacht wurden die Zeitpunkte pro zehn Zentimeter Aufspiegelung dokumentiert. Der Versuch war durch das Erlöschen eines Potenzialgradienten im Brunnenmodell beendet. Der Wasserspiegel befand sich zu diesem Zeitpunkt im gesamten Modell auf selber Höhe (Höhe des ruhenden Grundwasserspiegels).

3.5 Methodik der Pumpversuchssimulation

Die Pumpversuche am physikalischen Modell (Versuchsreihe 1 und 2) wurden mit zwei numerischen Simulationsprogrammen (Hydrus 2D (PC-PROGRESS) und PMWIN (Simcore Software)) nachgestellt. Dies zielte auf die Erfassung von komplexeren Auswertungsmethoden von Pumpversuchen an Schachtbrunnen ab.

3.5.1 Hydrus 2D - Methodik

Das Programm Hydrus 2D ist ein Finite-Elemente-Programm und wird für geohydraulische Fragestellungen herangezogen.

Die Randbedingungen, die beim physischen Modell angenommen und bestätigt werden konnten, wurden in Hydrus 2D an einer rotationssymmetrischen Modellgeometrie definiert (Abbildung 9). Die Durchsatzrate wurde über eine inverse Parameteranpassung berechnet. Dabei wurde die Durchsatzrate an die Förderrate (variable flux) aus den physischen Modellversuchen instationär angepasst. Die Durchsatzrate wurde für die Versuchsreihen 1 und 2 bei den jeweiligen fünf Absenkstufen invers berechnet.

Das den Berechnungen zu Grunde liegende hydraulische Modell, mit dem Hydrus 2D rechnet, ist die Richards-Gleichung für den ungesättigten Wasserfluss. In vereinfachter Form wird die Richards-Gleichung auch für die Berechnung des gesättigten Wasserflusses (vorrangiger Zustand im Versuchsboden während den Pumpversuchen am physischen Brunnenmodell) verwendet. Die Abschätzung der Parameter des Van Genuchten – Mualem Modells, die für die Lösung der Richards-Gleichung benötigt werden, erfolgt über eine Pedotransferfunktion. Deren Eingangswerte stellen die Texturparameter des Versuchsbodens (hier die Bodenart und Durchsatzrate) dar (UDATA, 2004).

Für die inverse Modellierung mussten neben der Förderrate (variable flux) auch die Potenzialhöhen in 2 Kontrollpunkten (Observation Node) angegeben werden. Diese befanden sich auf der Brunnensohle. Deren Höhe spiegelte die Absenkstufe bei der jeweiligen Förderrate wieder. Als Förderraten dienten die Messergebnisse aus den Versuchsreihen 1 und 2. Das Material zwischen den Randbedingungen war Sand mit der Abänderung des k_s -Wertes auf $0,00007$ bzw. $0,005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Der Berechnungszeitraum für die inverse Simulation betrug 5000 Sekunden.

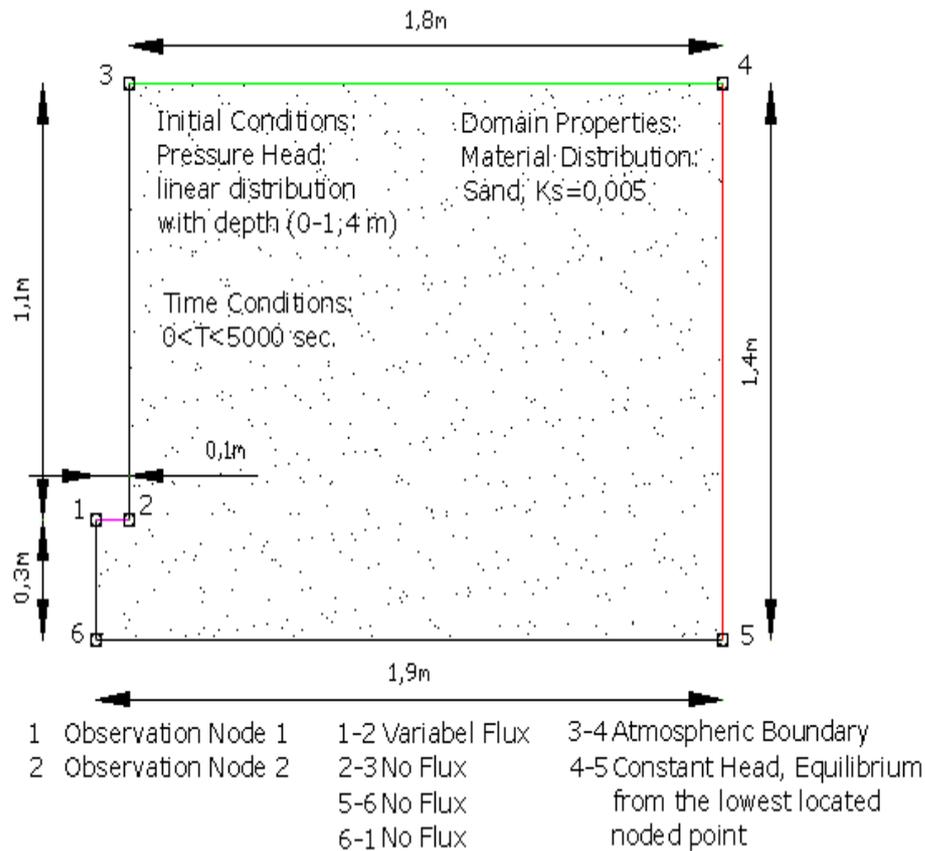


Abbildung 9: Hydrus 2D – Modellbedingungen

3.5.2 PMWIN - Methodik

PMWIN ist eine numerische Simulationssoftware, die unter Anwendung der Methode der finiten Differenzen die Modellierung bzw. Lösung von grundwasserhydraulischen Problemstellungen erlaubt. PMWIN beinhaltet eine Vielzahl an aufgabenstellungsspezifischen Modellen. MODFLOW ist das Modell zur Berechnung von Potenzialverteilungen und Wasserbilanzen in definierten Bodenkörpern. Innerhalb der Modelle stehen dem Benutzer mehrere Solver zur Verfügung, die eine weitere differenziertere Problemlösung ermöglichen. Zur Berechnung der Potenzialverteilungen bzw. Wasserbilanzen wurde das Modell MODFLOW mit dem Solver SIP (strongly implicit procedure) verwendet. Dieser Solver wurde verwendet, da er für Modelle mit hohen relativen Potenzialhöhendifferenzen zwischen Start- und Zielwert empfohlen wird (Fürst, 2012).

Um die Durchsatzrate als Ergebnis einer Pumpversuchsauswertung zu erhalten, war es notwendig ein weiteres Modul von PMWIN zu verwenden. Dies war notwendig, da MODFLOW mit einer durch den Benutzer voreingestellten und fixierten Durchsatzrate rechnet und somit deren Anpassung nicht ermöglicht. Die Anpassung von Parametern durch eine inverse Simulation ist mit dem Modell PEST (Parameter Estimator) möglich (Lösung durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Für PEST ist es notwendig Kontrollpunkte (Boreholes and Observations) innerhalb des Modells zu definieren. Diese Kontrollpunkte geben die Zielwerte bei der inversen Parameteranpassung vor. Im konkreten Fall der Pumpversuchsmodellierung stellten die Kontrollpunkte drei Kontrollpegel dar. Bei den Kontrollpegeln handelte es sich um drei, während den physischen Modellversuchen gemessenen, Randpotenziale. Konkret handelte es sich dabei um die höhenmäßige Lage des

Wasserspiegels im Brunnen sowie des unbeeinflussten Grundwasserspiegels (siehe Abbildung 8, Punk A und B).

Da die Handhabung von PEST teilweise nicht nachvollziehbar war, wurde zur Kontrolle der Ergebnisse von PEST eine weitere Methode zur inversen Parameteranpassung angewendet. Es wurde im vorherigen Absatz darauf hingewiesen, dass MODFLOW mit fixierten Durchsatzraten rechnet. Um eine inverse Parameteranpassung auch mit MODFLOW zu bewerkstelligen, kann daher eine oftmalige manuelle Korrektur der fixierten Durchsatzrate vorgenommen werden. Auf diesem Weg ist auch mit dem Modell MODFLOW eine „inverse Parameteranpassung“ möglich. Für diese manuelle Anpassung lässt man sich die Absenkung in der Brunnenzelle, bei konstanter Förderrate (laut Versuchsreihe 1 und 2), durch MODFLOW mit dem Solver SIP, bei einer geschätzten Durchsatzrate berechnen. Im Results Extractor kontrolliert man die berechnete Absenkung und korrigiert daraufhin die Durchsatzrate händisch im gesamten Modell. So kann nach wenigen Iterationsschritten die gewünschte Absenkung erzielt und die dazugehörige Durchsatzrate ermittelt werden.

Brunnenmodellkonfiguration

PMWIN erlaubt die Lösung der Schachtbrunnenthematik in einem kartesischen Koordinatensystem. Somit musste hier der rotationssymmetrische Ansatz weg gelassen werden. Der zu simulierende Pumpversuch wurde geometrisch dem physischen Laborversuch gleichgesetzt. Jeder Layer (Typ 1 (ungespannter Aquifer) bzw. Typ 3 (ungespannter/gespannter Aquifer mit variierender Transmissivität)) verfügte über eine Mächtigkeit von 10 cm (insgesamt 14 Layer). Die Brunnenzelle befand sich in Layer 11 (Abbildung 10), also in einer Höhe von 30 bis 40 cm. Der Senkenterm wurde der Pumprate der Versuchsreihen 1 und 2, mit der jeweiligen Absenkstufe, gleichgesetzt. Die übrigen Randbedingungen wurden wie in der Modellierung mit Hydrus 2D vorgesehen. Für die inverse Berechnung wurde der Durchsatzrate ein Startwert gleich den Werten des Darcy-Versuchs zugeordnet. Alle übrigen Programmeinstellungen wurden im voreingestellten Zustand belassen. Die zeitliche Diskretisierung wurde auf eine Sekunde Gesamtsimulationszeit beschränkt, da es sich um eine stationäre Pumpversuchsauswertung handelte. Außerdem wurden für die inverse Parameterbestimmung drei Kontrollpegel definiert.

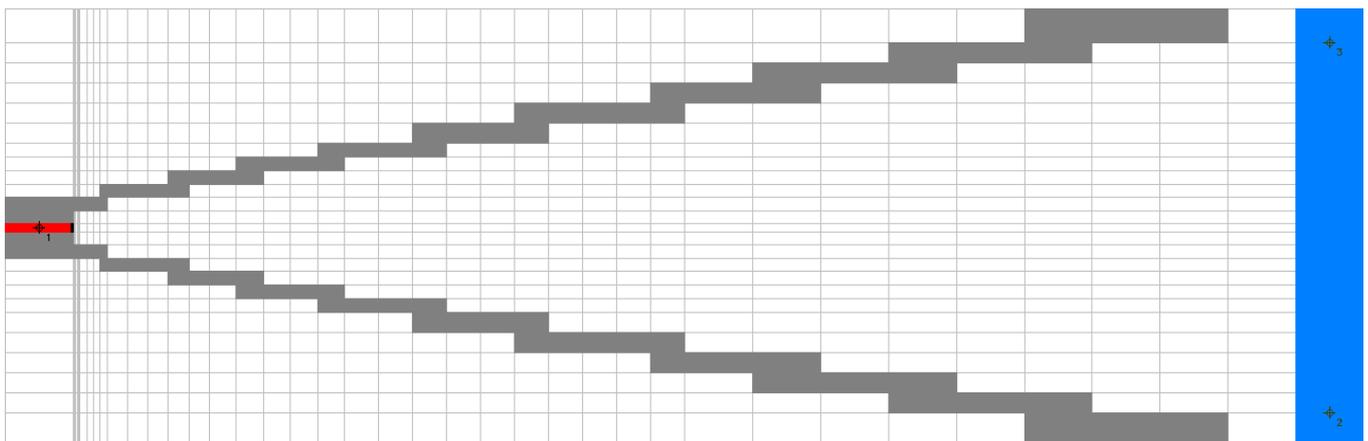


Abbildung 10: PMWIN 8 – Modellbedingungen – Layer 11

In Abbildung 10 sieht man in Rot die Brunnenzelle mit dem in ihr befindlichen Kontrollpegel. Das Segment des Brunnens ist durch eine Randstromlinie (graue Zellen) geometrisch abgegrenzt. Der ruhende Wasserspiegel im hinteren Teil des Modells ist durch eine konstante Potenzialhöhe von

140 cm definiert worden. Im Bereich des ruhenden Wasserspiegels befanden sich auch die weiteren zwei Kontrollpegel. Um eine undurchlässige Brunnenwand simulieren zu können, wurden die Brunnenzelle sowie die darüber liegenden Zellen mit einer Sperrfunktion für horizontale Transportprozesse (Horizontal Flow Barrier) ausgestattet. Damit konnte die Zuströmung in den Brunnen ausschließlich über die unter der Brunnenzelle liegende Zelle erfolgen.

Anhand des bis hier geschilderten Eingabefortschritts (bei inaktiven Kontrollpegeln) konnte das Programm PMWIN mit dem Solver SIP Potenzialnetze und Wasserbilanzen bei beliebigen Förderraten für das definierte Brunnenmodell berechnen. Durch die Aktivierung der Kontrollpegelhöhen und die Angabe einer Förderrate in der Brunnenzelle konnte die inverse Anpassung der Durchsatzrate gestartet werden. Da in PMWIN die Durchsatzrate in einen horizontalen und einen vertikalen Anteil getrennt wird, war es nötig die beiden Parameter für die Berechnung mit PEST als von einander abhängig zu definieren. Damit war es möglich eine isotrope Durchsatzrate zu berechnen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Modellversuchsdaten gliederte sich in folgende Abschnitte.

- Analyse der Pumpversuchsdaten des physischen Brunnenmodells
- Pumpversuchsauswertung

Die Versuchsreihen 1, 2 und 3 (Datengrundlage für die Auswertung) umfassten insgesamt 27 Versuche. Dabei entfallen 14 auf die Versuchsreihe 1, 8 auf die Versuchsreihe 2 und 5 auf die Versuchsreihe 3.

4.1 Analyse der Pumpversuchsdaten des physischen Brunnenmodells

Für die Analyse der Pumpversuchsdaten wurden ausschließlich die Versuchsreihen 1 und 2 herangezogen. Diese Analyse zielte vor allem auf die Darstellung der Strömungsbedingungen sowie der Zusammenhänge zwischen den geometrischen und hydraulischen Parametern des Pumpversuchs an einem Schachtbrunnen ab. Durch diese Analyse sollte eine Formel für die Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen geschaffen werden. Die Analyse ging mit der Prämisse von korrekten, tatsächliche Feldverhältnisse widerspiegelnden, Modellversuchsdaten konform. Es konnten jedoch auf Grund von fehlenden Referenzdaten systematische Fehler bei der Versuchsdurchführung nicht ausgeschlossen werden.

4.1.1 Potenzialnetz

Die Potenzialnetze wurden für die bei stationären Bedingungen erfassten Potenzialhöhen mit dem Programm Surfer 9 (Golden Software) durch Interpolation erstellt. Die Interpolation wurde mit dem Kriging-Verfahren durchgeführt. Da im unmittelbaren Brunneneinlauf keine Potenzialhöhen gemessen werden konnten (Halbkreis von 10 cm Radius um den Brunnenfilter) wurden zur Glättung der Potenzialnetze Potenziale an zusätzlichen Punkten geschätzt.

Die Potenzialnetze geben Aufschluss über die Strömungsbedingungen im Modell und sind eine Kontrolle für die angenommenen Randbedingungen. Da die Durchsatzrate von Versuchsboden 2 eine messbare Abnahme der Ausgangspotenzialhöhen im Bodenkörper nicht gestattete, wurden die Potenzialnetze nur für die Versuchsreihe 1 erstellt. Nachfolgend sind die charakteristischen Potenzialverteilungen für die 5 Absenkstufen dargestellt (Abbildung 11 bis Abbildung 15).

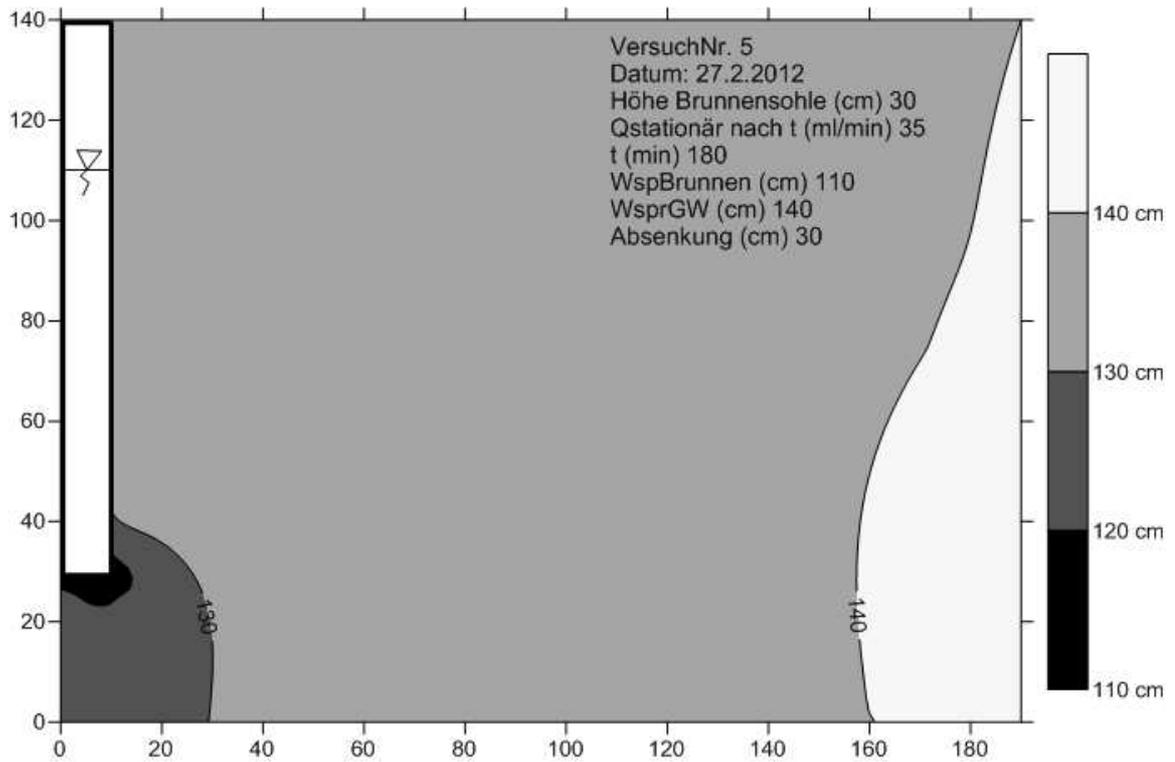


Abbildung 11: Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 30 cm

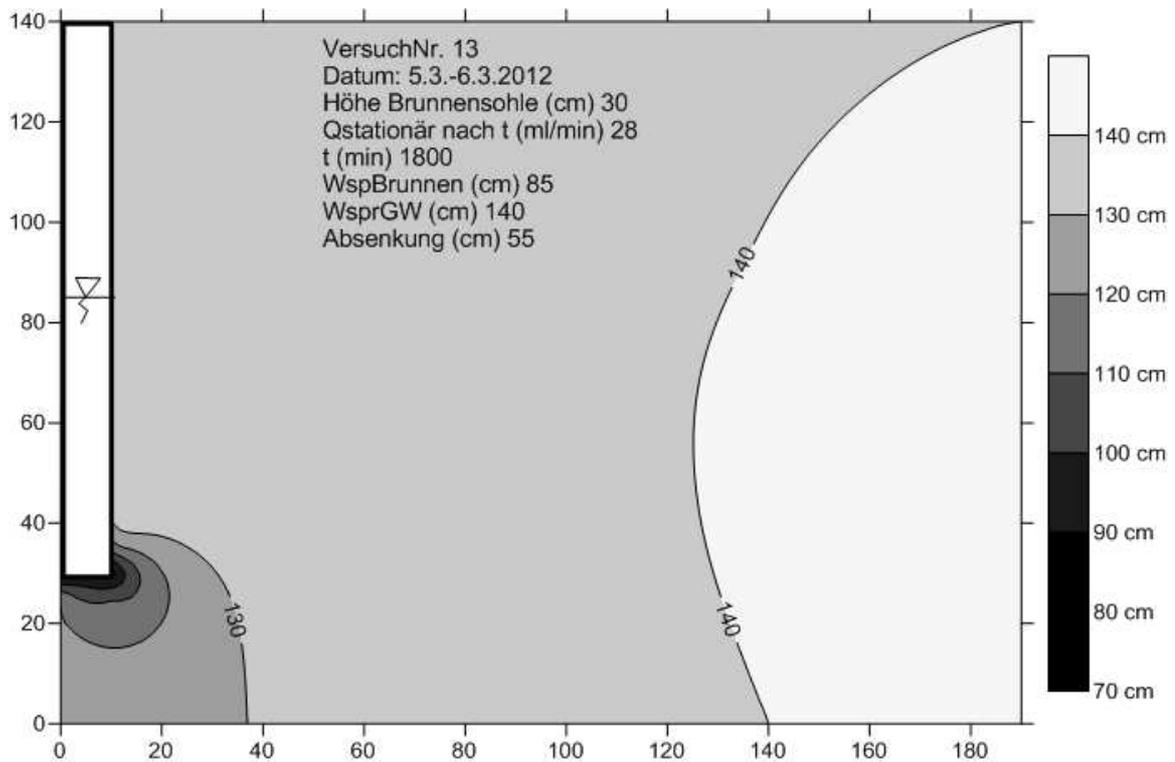


Abbildung 12: Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 55 cm

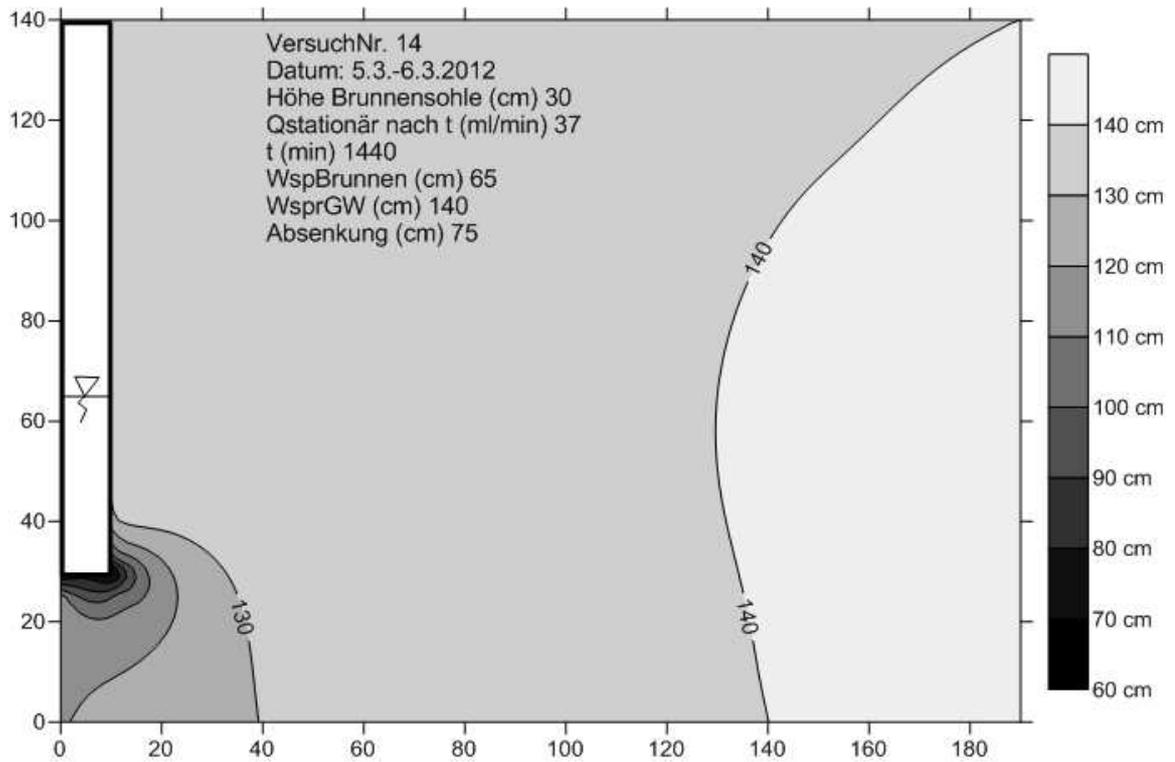


Abbildung 13: Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 75 cm

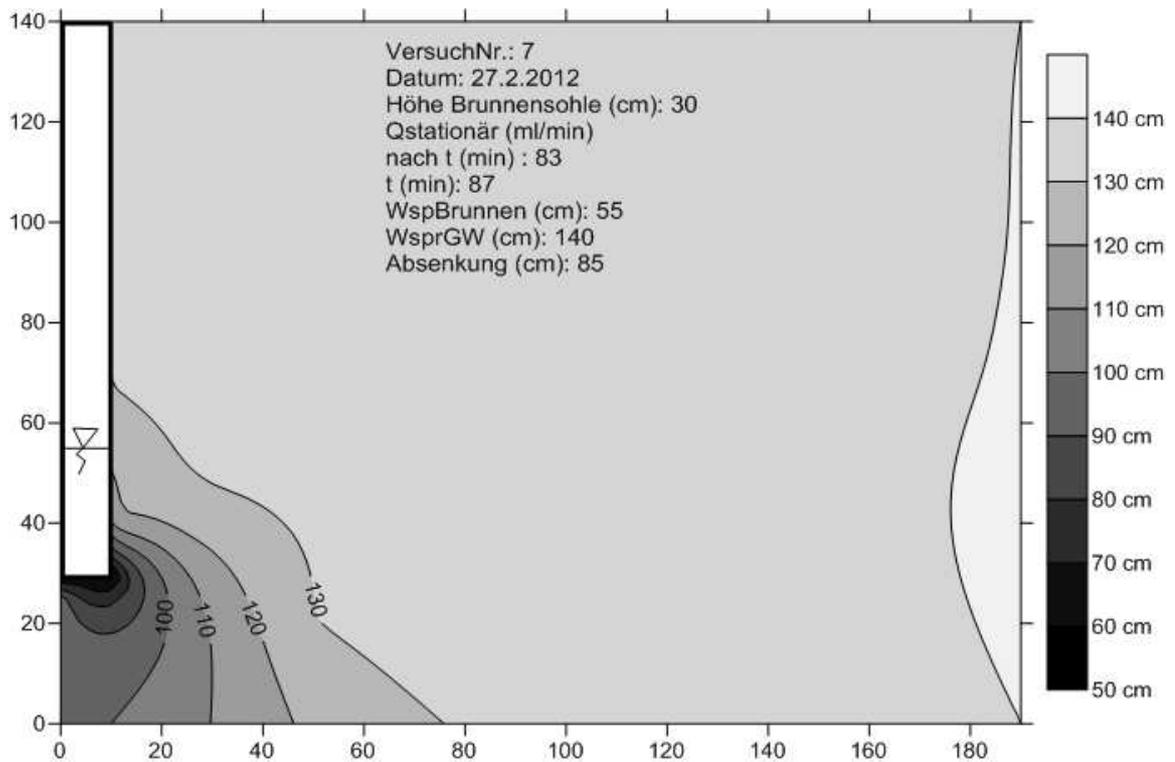


Abbildung 14: Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 85 cm

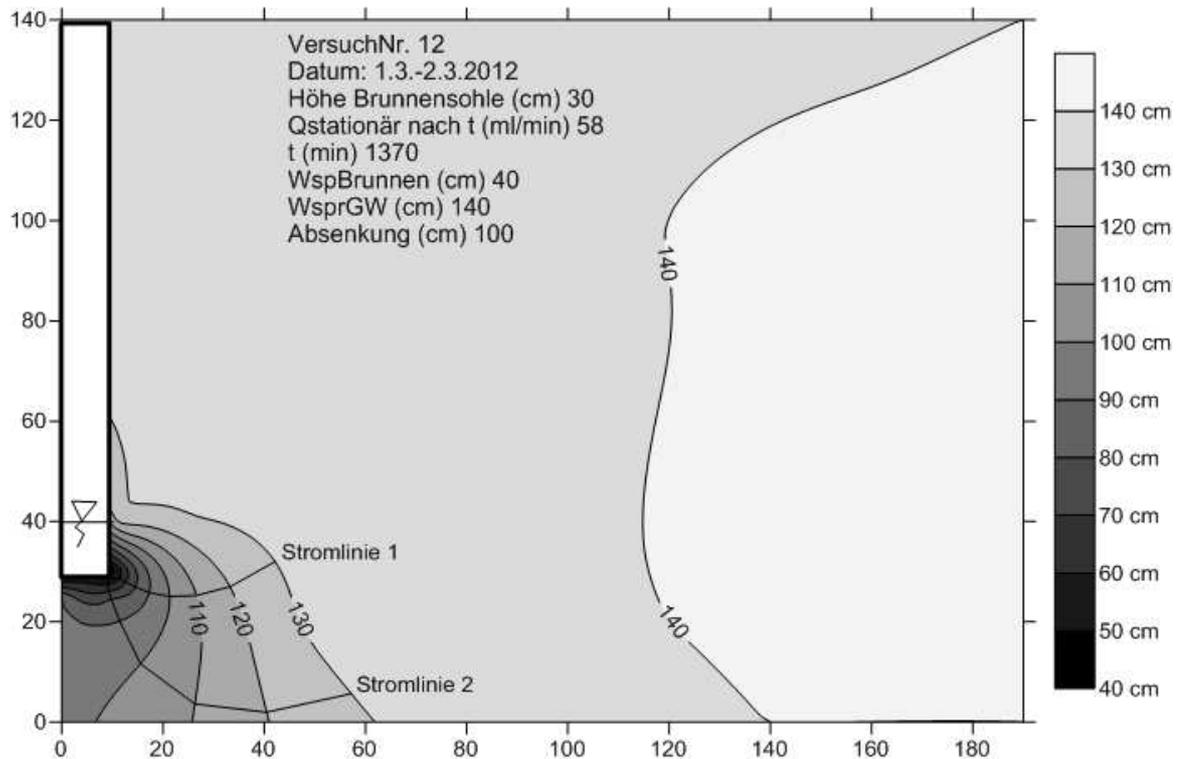


Abbildung 15: Potenzialverteilung von Versuchsboden 1 bei einer Absenkung von 100 cm

Durch die berechneten Potenzialnetze konnte gezeigt werden, dass die angenommenen Randbedingungen erfüllt wurden. In Bezug auf die hintere Randbedingung (Randpotenziallinie ($H=140$ cm) beim Einlauf des Wassers in den Bodenkörper) ist anzumerken, dass diese keine Vertikale darstellte, sondern durch gemessene Kapillareffekte in den äußersten zwei Messpunkten minimal verschoben wurde.

Um außerdem nachzuweisen, dass die Strömungsverhältnisse im unmittelbaren Brunneneinzugsbereich laminar sind, wurden die Reynoldszahlen, als Indikator für laminare Strömungsbedingungen, entlang der Stromlinien 1 und 2 (siehe Abbildung 15) berechnet. (Tabelle 6)

d in mm	0,06								
v in $m^2 \cdot s^{-1}$	1,31E-06								
k_s in $m \cdot s^{-1}$	7,00E-05								
Stromlinie Nr.	H_1 in cm	H_2 in cm	r_1 in cm	r_2 in cm	z_1 in cm	z_2 in cm	∇H	q in $m^3 \cdot s^{-1}$	Re
1	130	120	42,3	33,2	32,0	26,9	1,0	6,71E-05	3,E-03
1	120	110	33,2	26,7	26,9	25,2	1,5	1,04E-04	5,E-03
1	110	100	26,7	21,3	25,2	25,0	1,9	1,30E-04	6,E-03

1	100	90	21,3	17,3	25,0	25,8	2,5	1,72E-04	8,E-03
1	90	80	17,3	14,7	25,8	26,9	3,5	2,48E-04	1,E-02
1	80	70	14,7	12,6	26,9	27,9	4,3	3,01E-04	1,E-02
1	70	60	12,6	11,5	27,9	28,5	8,0	5,59E-04	3,E-02
1	60	50	11,5	9,9	28,5	28,8	6,1	4,30E-04	2,E-02
1	50	40	9,9	9,8	28,8	30,0	8,3	5,81E-04	3,E-02
2	130	120	57,2	40,5	5,6	2,0	0,6	4,10E-05	2,E-03
2	120	110	40,5	26,4	2,0	3,6	0,7	4,93E-05	2,E-03
2	110	100	26,4	15,6	3,6	11,7	0,7	5,19E-05	2,E-03
2	100	90	15,6	14,5	11,7	20,1	1,2	8,26E-05	4,E-03
2	90	80	14,5	9,7	20,1	24,4	1,6	1,09E-04	5,E-03
2	80	70	9,7	9,3	24,4	26,0	6,1	4,24E-04	2,E-02
2	70	60	9,3	9,1	26	27,3	7,6	5,32E-04	2,E-02
2	60	50	9,1	8,9	27,3	28,4	8,9	6,26E-04	3,E-02
2	50	40	8,9	9,2	28,4	30,0	6,1	4,30E-04	2,E-02

Tabelle 6: Potenziale entlang der Stromlinien 1 und 2 bei Versuch Nr. 12 (Absenkung 100 cm)

Die Reynoldszahl konnte erst nach Ermittlung des lokalen Strömungsgradienten (grad H) sowie des dabei vorherrschenden Flusses (q) berechnet werden.

$$\text{grad } H = \nabla H = \frac{\Delta H}{\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta z)^2}}$$

Formel 24: lokaler Potenzialgradient zur Bestimmung der Re Zahl.

$$\frac{Q}{A} = q = k_s \nabla H$$

Formel 25: Umformung der Darcy-Gleichung

$$Re = \frac{qd}{\nu}$$

Formel 26: Reynoldszahl

∇H in m^*m^{-1} Potenzialgradient

ΔH	in m	Potenzialunterschied zwischen 2 Punkten (H_1-H_2)
Δr	in m	horizontaler Abstand zwischen den Punkten H_1 und H_2
Δz	in cm	vertikaler Abstand zwischen den Punkten H_1 und H_2
q	in $m^3 \cdot s^{-1}$	spezifischer Durchfluss
Re		Reynolds-Zahl
d	in m	Abflussquerschnitt, angenommen mit d_{10} der Bodenmatrix
ν	in $m^2 \cdot s^{-1}$	kinematische Viskosität des strömenden Fluides (Wasser)

(Bear, 1987)

Die Potenzialbilder zeigten die charakteristische Konzentration der Äquipotenziallinien um den Brunneneinlauf. Durch die starke Konzentration der Äquipotenziallinien war ersichtlich, dass im unmittelbaren Brunneneinlauf hohe Gradienten auftraten. Um die Höhe der aufgetretenen Gradienten abschätzen zu können, wurden für den Versuch 12 (höchste Absenkstufe) die Gradienten von zwei, in Abbildung 15 dargestellten, Stromlinien berechnet. Aus der Berechnung ging hervor, dass Gradienten bis ca. 9 und Reynolds-Zahlen bis ca. 0,03 auftraten. Durch diese Erkenntnis wurde klar, dass der Ansatz von Darcy (bedingt laminare Strömungsverhältnisse) im unmittelbaren Brunneneinlauf gültig war (Bear und Verruijt, 1987).

Nichtsdestotrotz, traten im Brunneneinlauf Strömungswiderstände auf, die über jenen aus dem Laborversuch lagen (Querschnittseinschnürung zwischen Stromlinien). Der Laborwert wurde aber trotzdem als Richtwert für die Auswertung verwendet, da er für den übrigen Bodenkörper im physischen Modell gültig war. Die in der Auswertung berechneten Durchsatzraten waren somit nicht als räumlicher Mittelwert über das gesamte Brunneneinzugsgebiet zu sehen, sondern als Durchsatzrate des limitierenden Brunneneinlaufbereichs. Da die Durchsatzrate als Widerstandbeiwert verstanden werden kann, waren die Widerstände sowie die Gradienten im physischen Modell höher, somit die Durchsatzrate geringer. Die Laborwerte gaben daher eine höhere Durchsatzrate, als die im limitierenden Brunneneinlaufbereich des physischen Modells gemessene, vor.

	∇H in $m \cdot m^{-1}$	q in $m^3 \cdot s^{-1}$
physikalisches Modell	8,9	6,E-04
Darcy-Versuch	2,0	1,E-05

Tabelle 7: Vergleich des maximalen Gradienten und der maximalen Reynolds-Zahl beim physikalischen Modellversuch und dem Darcy-Versuch (Versuchsboden 1)

4.1.2 Q-r-s- k_s Beziehung – Methodik

Ein Ziel dieser Arbeit war der Versuch, einen Zusammenhang zwischen den geometrischen und hydraulischen Parametern beim Pumpversuch an einem Schachtbrunnen zu identifizieren. Die dabei betrachteten Parameter umfassten

Q	in $m^3 \cdot s^{-1}$	Förderrate beim stationären Pumpversuch
-----	-----------------------	---

r	in m	Brunnenradius
s	in m	Betrag der Absenkung des Ruhewasserspiegels
k_s	in $m^3 \cdot s^{-1}$	Durchsatzrate der Bodenmatrix.

Es wurde ausschließlich nach einem Zusammenhang zwischen der Förderrate und den übrigen drei Parametern gesucht. Abhängigkeiten zwischen r, s und k_s wurden auf Grund der Datengrundlage als nicht vorhanden angenommen. Die Variablen r, s, k_s wurden innerhalb der Q-r-s- k_s Beziehung als Unabhängige und Q als Abhängige angenommen.

Datengrundlage für diese Auswertung waren die Pumpversuche der Versuchsreihe 1 und 2. Zu Beginn der Auswertung wurden die Versuchsergebnisse kritisch begutachtet und aufbereitet. Davon waren hauptsächlich die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 betroffen. Bei dieser schwankten die Förderraten bei der Wiederholung der fünf Absenkstufen stark. Je mehr Versuche durchgeführt wurden, desto geringer wurden die Förderraten. Eine mögliche Ursache bestand in der Verstopfung des Brunnenfilters. Der exakte Grund konnte jedoch nicht eruiert werden. Aus diesem Grund wurde, unter dem Ansatz der Langzeitnutzung eines Brunnens, den späteren Versuchen in ihrer Gültigkeit Vorrang gegeben. Da Versuche mit niedriger Absenkung nur zu Beginn der Versuchsreihe durchgeführt wurden, und obiger Sachverhalt erst nach Durchführung der ersten Versuchsreihe diskutiert wurde, kam es zur teilweisen linearen Inter- bzw. Extrapolation der Förderraten zwischen den jeweiligen Absenkstufen. Ansonsten wurden die für die Auswertung herangezogenen Förderraten durch arithmetische Mittelung und ein logisches Ausschlussverfahren (Plausibilitätskontrolle) festgelegt.

Für die gesamte Auswertung wurde in der Einheit $m^3 \cdot s^{-1}$ für ein Brunnensegment von 360° gerechnet. Die unmittelbaren Versuchsergebnisse wurden jedoch in der Einheit $ml \cdot min^{-1}$ für ein Segment von 15° (Brunnengeometrie) erfasst. Der Umrechnungsfaktor lag somit bei $4,0E-07$.

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
s in m	Q für 360° in $m^3 \cdot s^{-1}$	Q für 360° in $m^3 \cdot s^{-1}$
0,30	9,40E-06	9,80E-05
0,55	1,12E-05	1,35E-04
0,75	1,48E-05	1,48E-04
0,85	1,66E-05	1,88E-04
1,00	2,32E-05	2,08E-04

Wert linear inter- bzw. extrapoliert

Tabelle 8: Auswertungsgrundlage für Q-r- k_s -s Beziehung bzw. Ergebnis der physischen Modellpumpversuche

Q-r Beziehung

Die Pumpversuche wurden nur mit einem Brunnenradius (0,1 m) durchgeführt. Daher konnte die Beziehung zwischen Q und r experimentell nicht untersucht werden. Über die Annahme, dass die Aufstiegs geschwindigkeit des Grundwasserspiegels in einem Schachtbrunnen nur vom Gradienten des Wasserspiegels und der Kornzusammensetzung der Bodenmatrix abhängig ist, wurde eine quadratische Beziehung von Q und r angenommen (Formel 27). Diese Annahme stützte sich auf die Integration der Darcy-Gleichung in die umgeformte Kontinuitätsbedingung ($A \cdot v = Q$) für kreisförmige Durchflussquerschnitte.

$$Q = A v = r^2 \pi k \nabla H$$

Formel 27: Q-r-Beziehung

Q	in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Durchfluss
A	in m^2	Fließquerschnitt
v	in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Fließgeschwindigkeit
r	in m	Querschnittsradius
k	in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Durchsatzrate
∇H	in $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	Potenzialgradient

Q-s Beziehung

Durch die Logarithmierung der bereinigten Förderraten konnte ein linearer Zusammenhang zwischen den Förderraten (Q_i) und Absenkungen (s_i) hergestellt werden (Abbildung 16). Daraus ergab sich die Annahme über eine quadratische Beziehung zwischen Q und s.

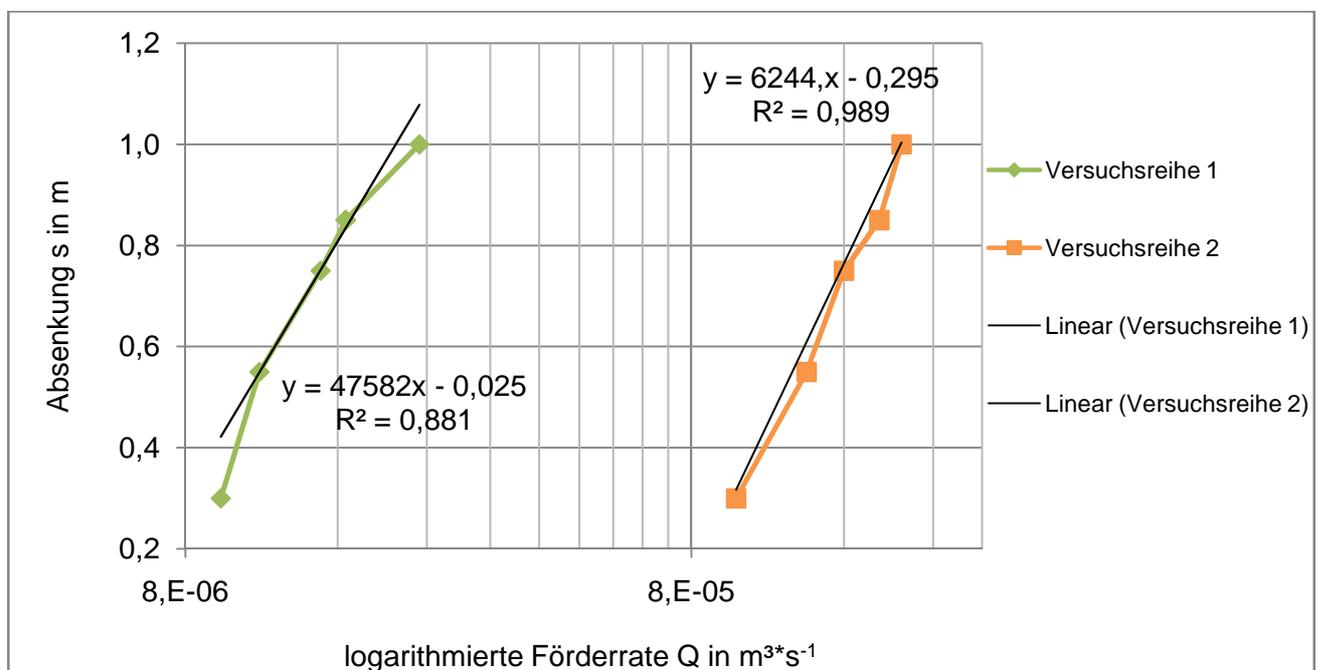


Abbildung 16: Korrelation zwischen Förderhöhe und Absenkung

Die quadratische Korrelation zwischen Förderrate (Q) und Absenkung (s) konnte mit einem relativ eindeutigen Bestimmtheitsmaß (quadratischer Korrelationskoeffizient, R^2) von 0,88 und 0,99

bestätigt werden. Auf Grund der stärker variierenden Messergebnisse von Versuchsreihe 1 gegenüber der Versuchsreihe 2 wurde ein niedrigerer Korrelationskoeffizient von Versuchsreihe 1 bewusst toleriert.

Q-k_s Beziehung

Es konnte als sehr günstig angesehen werden, dass die Durchsatzrate der beiden Versuchsböden sich nahezu um zwei Zehnerpotenzen unterscheidet. Die Betrachtung der Veränderung der Förderraten zwischen den Versuchsreihen 1 und 2, bei jeweils gleicher Absenkung, zeigte einen Sprung von zirka einer Zehnerpotenz. In Bezug auf die Beziehung von Q und k_s war der Verdacht auf potentiellen Zusammenhang von k_s zu Q naheliegend.

Q-r-s-k_s Beziehung –Ergebnisse

Für die Berechnung der Förderrate bei einem Schachtbrunnen konnte, unter Betrachtung der Parameter r, s und k_s, sowie deren intuitiver Anpassung, nachfolgende Brunnenformel aufgestellt werden.

$$Q = \frac{r^2 \pi \sqrt{k_s} s^{0,5}}{C}$$

Formel 28: Brunnenformel Leitner

Q	in m ³ *s ⁻¹	Förderrate
r	in m	Brunnenradius, hier 0,1
k _s	in m*s ⁻¹	Durchsatzrate, hier 7E-05 und 5E-03
s	in m	Absenkung
C		Konstante, 12 (Kurvenanpassung)

	Förderrate gemessen		Förderrate berechnet	
Versuchsreihe	1	2	1	2
s in m	Q für 360° in m ³ *s ⁻¹			
0,30	9,4E-06	9,8E-05	1,2E-05	1,0E-04
0,55	1,1E-05	1,4E-04	1,6E-05	1,4E-04
0,75	1,5E-05	1,6E-04	1,9E-05	1,6E-04
0,85	1,7E-05	1,9E-04	2,0E-05	1,7E-04
1,00	2,3E-05	2,1E-04	2,2E-05	1,9E-04

Tabelle 9: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Förderraten

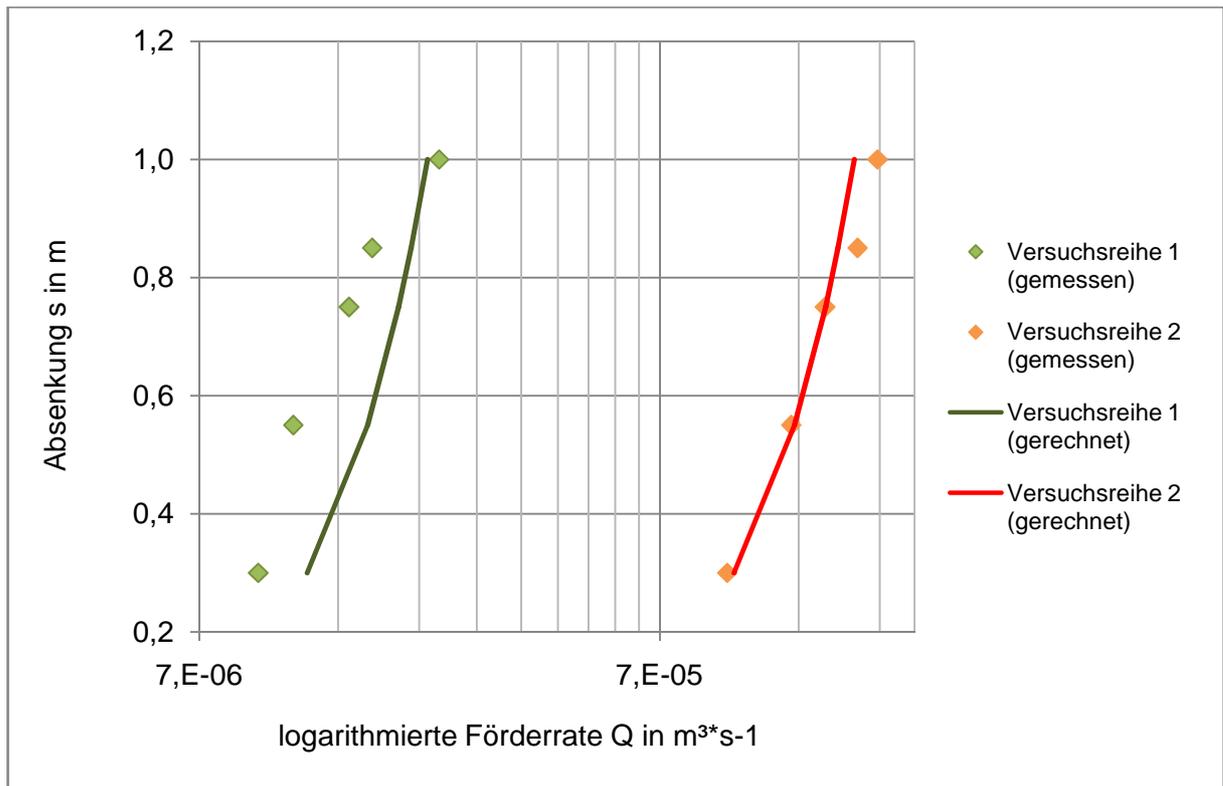


Abbildung 17: Vergleich von gemessener und berechneter Förderrate

Abbildung 17 veranschaulicht, dass mit der aufgestellten Beziehung zwischen den Parametern r , s , k_s und Q , die durchgeführten Pumpversuche nachgerechnet werden konnten. Ob obige Formel eine mögliche Brunnenformel für Schachtbrunnen dargestellt, ist ungewiss. Für eine solche Mutmaßung ist eine erheblich umfangreichere Datengrundlage erforderlich.

4.2 Pumpversuchsauswertung

Grundlage für die Pumpversuchsauswertung sind die physischen Modellversuchsergebnisse. Ziel dieser Pumpversuchsauswertung war die Berechnung einer Durchsatzrate, welche als Zielwert durch die Laborversuche vorgegeben war. Zur Anwendung kamen neben einer Vielzahl an Brunnenformeln auch die Simulationsprogramme Hydrus 2D und PMWIN. Ziel dieser Auswertung war die Erfassung der genauesten Methode zur Auswertung eines Pumpversuchs an einem Schachtbrunnen. Für die Auswertung wurden die Daten aus allen drei Versuchsreihen herangezogen.

4.2.1 Pumpversuchsauswertung durch Brunnenformeln

Trotz der Vielzahl an Brunnenformeln zur Auswertung von Pumpversuchen, ist keine Formel zur Auswertung eines Pumpversuchs an einem Schachtbrunnen vorhanden. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Brunnenformeln (Formel 29-41), die nicht explizit für einen Schachtbrunnen geeignet sind, getestet. Dies sollte etwaige adäquate Lösungsmethoden aufdecken. Bei der Auswahl der verwendeten Brunnenformeln wurde darauf geachtet vorrangig jene zu wählen, die für ungespannte, homogene und isotrope Aquifere gelten und stationäre Pumpversuche auswerten (Tabelle 12).

Nachfolgend sind die allgemeinen Daten, die für die Berechnung der Durchsatzrate für die Versuchsreihe 1, 2 und 3 verwendet wurden, angeführt.

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
s in m	Q für 360° in m ³ *s ⁻¹	Q für 360° in m ³ *s ⁻¹
0,30	9,40E-06	9,80E-05
0,55	1,12E-05	1,35E-04
0,75	1,48E-05	1,48E-04
0,85	1,66E-05	1,88E-04
1,00	2,32E-05	2,08E-04
	k_s in m*s ⁻¹	k_s in m*s ⁻¹
Darcyversuch	7,0E-05	5,0E-03
Hazen	4,2E-05	4,2E-03

d10 in mm	0,06	0,60
d60 in mm	0,20	0,90
U=d60/d10	3,30	1,50
d80 in mm	0,35	1,30

Modellgeometrie	
r in m	0,1
H in m	1,4
R in m	1,9
A in m ²	0,0314
h _{sohle} in m	0,3

Tabelle 10: Datengrundlage für die Berechnung der Durchsatzrate durch die angegebenen Brunnenformeln für Versuchsreihe 1 und 2

	Versuch 1	Q(t)ml*min ⁻¹	570								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in sec.	0	15	30	48	67	88	113	141	176	228	382
	Versuch 2	Q(t)ml*min ⁻¹	540								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in sec.	0	16	33	53	76	99	126	158	198	258	453
	Versuch 3	Q(t)ml*min ⁻¹	550								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in sec.	0	16	33	52	72	95	122	152	190	249	432
	Versuch 4	Q(t)ml*min ⁻¹	430								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in sec.	0	18	38	61	86	113	145	181	229	301	514
	Versuch 5	Q(t)ml*min ⁻¹	420								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in sec.	0	18	39	63	89	117	149	188	236	312	521

Tabelle 11: Datengrundlage für die Berechnung der Durchsatzrate durch die angegebenen Brunnenformeln für Versuchsreihe 3

Isotroper und homogener Aquifer					
Konstante Aquifermächtigkeit					
Horizontaler GW-Spiegel vor Pumpversuchsbeginn und horizontaler Aquiklude					
		Gespannter Aquifer		Ungespannter Aquifer	
	Versuchszustand	stationär	instationär	stationär	instationär
Vollkommener Brunnen	Horizontaler Grundwassereintritt	Thiem	Theis' recoverytest	Sichardt Kozeny	

	Horizontal und vertikaler Grundwassereintritt			Thiem-Deputit	Ernst
Unvollkommener Brunnen	Vertikaler Grundwassereintritt	Lamb Forchheimer		Truelsen Faustformel1 Faustformel2 Dudgeon und Cox	Methode des aufsteigenden Wasserspiegels

Tabelle 12: Abgrenzung der angewendeten Brunnenformeln durch ihre Randbedingungen

$$k_s = \frac{Q}{2 \pi (H - \frac{s}{2})(H - (H - s)) \ln(\frac{R}{r})}$$

Formel 29: Brunnenformel nach Thiem

$$k_s = \frac{Q}{4 r (H - h_{sohle} - (H - h_{sohle} - s))}$$

Formel 30: Brunnenformel nach Lamb

$$k_s = \frac{Q}{2 \pi r (H - h_{sohle} - (H - h_{sohle} - s))}$$

Formel 31: Brunnenformel nach Forchheimer

$$k_s = \frac{s' 4 \pi (H - h_{sohle}) \log(\frac{t}{t'})}{2,3 Q}$$

Formel 32: Brunnenformel zur Auswertung eines Recoverytests nach Theis

s'	in m	Aufspiegelung, negative Absenkung
t	in s	Zeit seit Beginn des Pumpversuchs
t'	in s	Zeit seit Beginn des Recoveryversuchs (Aufspiegelung)

$$k_s = \left(\frac{30 Q}{2 r \pi (H - h_{sohle})} \right)^2$$

Formel 33: Brunnenformel nach Sichardt

$$k_s = \frac{Q}{2 r \pi (H - h_{sohle})}$$

Formel 34: Brunnenformel nach Kozeny

$$k_s = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln(\frac{R}{r})}{(H - h_{sohle})^2 - (H - h_{sohle} - s)^2}$$

Formel 35: Brunnenformel nach Thiem-Deputit

$$k_s = v_{max} f$$

Formel 36: Brunnenformel nach Truelsen

v_{\max} in $m \cdot s^{-1}$ maximale Aufstiegsgeschwindigkeit des Brunnenwasserspiegels um eine Versandung des Brunnens zu verhindern; abhängig von der Filterkieskörnung (Tabellenwert)

f Korngröße bei d_{80}

Truelsen gibt eigentlich eine maximale Förderrate an, die zusätzlich noch von der Querschnittsfläche des Brunnens (A) abhängig ist. Es wurde Q dividiert durch A als k_s vereinfacht angenommen.

$$k_s = \frac{Q}{(H - h_{\text{sohle}}) s}$$

Formel 37: Faustformel 1

Faustformel 1 ergibt sich aus der Vereinfachung der Formel nach Thiem-Deputit. Für überschlägige Berechnungen kann der $\ln(R \cdot r^{-1})$ gleich $2 \cdot \pi$ gesetzt werden, wodurch sich die obige Vereinfachung ergibt (Bieske, 1965). Außerdem wurde eine Korrektur für die in die Formel eingehende Aquifermächtigkeit H vorgenommen. Die Mächtigkeit des Aquifers wurde durch die Schachttiefe im Aquifer ersetzt.

$$s = \frac{Q}{r^2 \pi \left(\frac{H - h_{\text{sohle}}}{H - h_{\text{sohle}} - s} \right)^2}$$

Formel 38: Faustformel 2

Der Autor von Faustformel 2 ist unbekannt, sowie dessen Quelle.

$$k_s = \frac{Q}{H^2 f}$$

Formel 39: Brunnenformel nach Dudgeon und Cox

f Tabellenwert, abhängig von Brunnengeometrie und Lage des Ruhewasserspiegels

$$s = \frac{4,17 r^2}{\frac{(h_1 - h_2)}{2} (H - h_{\text{sohle}} + 10r)} \frac{h_1 - h_2}{\frac{2 - (h_1 - h_2)}{2(H - h_{\text{sohle}})} t_2 - t_1}$$

Formel 40: Bohrlochmethode nach Ernst

h_1, h_2 in m Wasserspiegel im Brunnenschacht zum Zeitpunkt t_1 bzw. t_2

$$k_s = \frac{h_1 - h_2}{t_2 - t_1}$$

Formel 41: Methode des aufsteigenden Wasserspiegels

Die Methode des aufsteigenden Wasserspiegels wurde vereinfacht. Die für den Schachtbrunnen unbekannt Konstante wurde gewollt weggelassen. Es kam lediglich zu einem Zeit-Absenkungsdiagramm, bei welchem nur die spätesten Aufspiegelungsraten für die Berechnung herangezogen wurden. Dies gründete auf der Annahme, dass bei einem ungespannten Aquifer zu Beginn der Aufspiegelung Speichervorgänge (Aufsättigung) in der Bodenmatrix einsetzen, die die Messwerte verfälschen (Kruseman et al., 1991).

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 16 Abbildung 17) zeigen die grafische Darstellung der mit den Brunnenformeln 29-41 berechneten Durchsatzraten (k_s). Diese stellen das Ergebnis der Auswertung der Pumpversuche (Versuchsreihe 1, 2 und 3) durch die recherchierten Brunnenformeln dar. Der Zielwert (die im Labor bestimmte jeweilige Durchsatzrate) ist als roter Graph dargestellt.

berechnete Durchsatzraten für Versuchsboden 1 (0,1-1,0 mm)

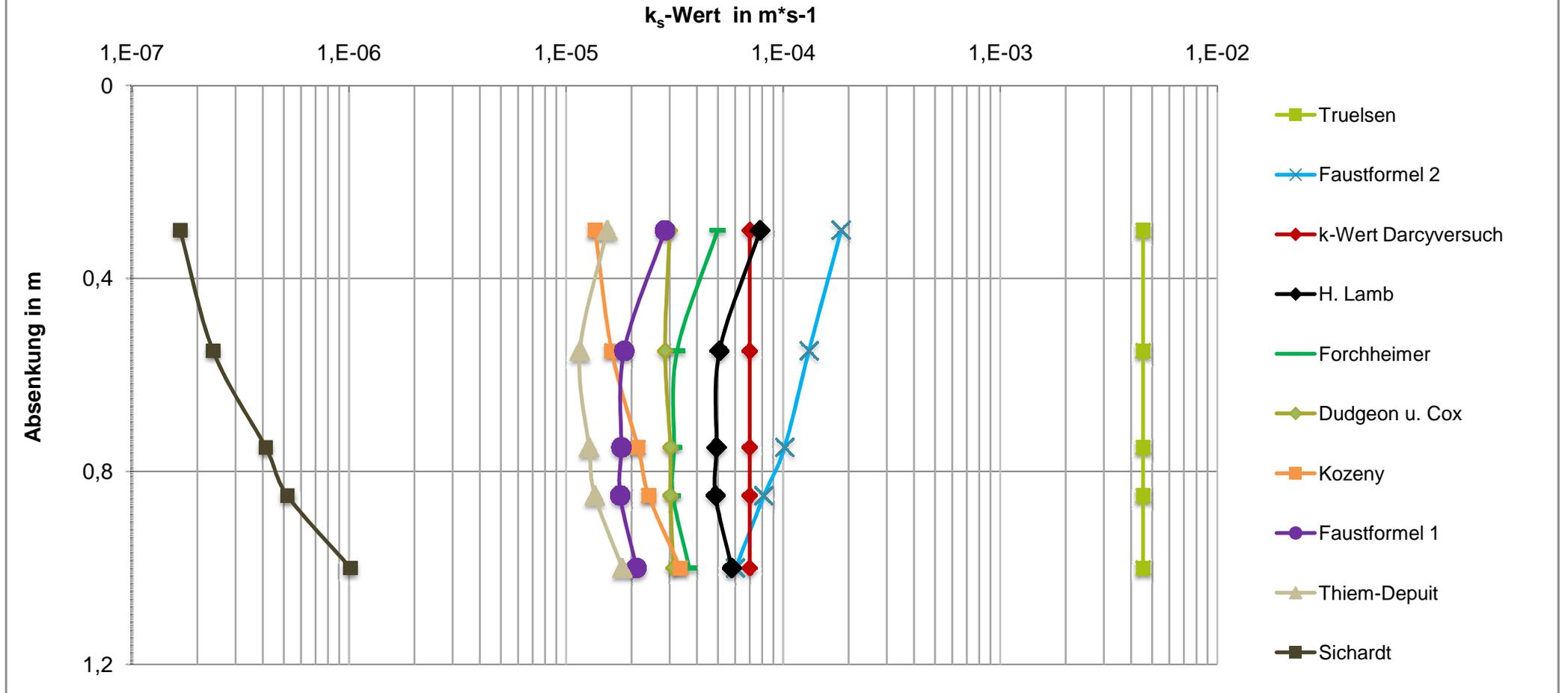


Abbildung 18: Ergebnisse der Brunnenformeln für Versuchsreihe 1

berechnete Durchsatzraten für Versuchsboden 2 (0,7-1,2 mm)

k_s -Wert in $m \cdot s^{-1}$

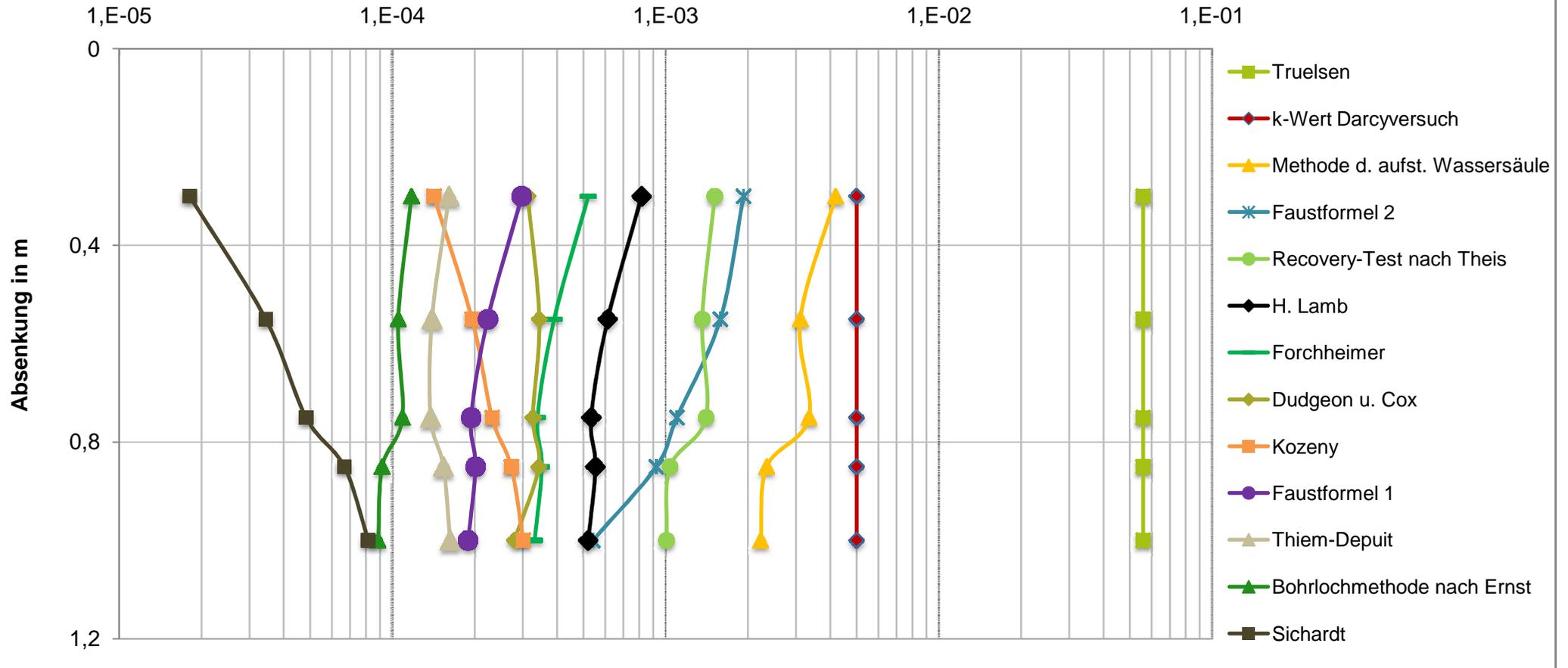


Abbildung 19: Ergebnisse der Brunnenformeln für Versuchsreihe 2 und 3

Die Ergebnisse der verschiedenen Brunnenformeln wichen von der Soll-Durchsatzrate umso stärker ab, desto unterschiedlicher die Randbedingungen waren. Als Soll-Durchsatzrate wurden die Werte aus den Darcy-Versuchen herangezogen. Einige der verwendeten Formeln lieferten Ergebnisse, die eine Streuung von einer Zehnerpotenz um den Sollwert aufwiesen. Diese waren als akzeptabel für die Anwendung bei der Pumpversuchsauswertung von Schachtbrunnen anzusehen. Generell fiel auf, dass die Ergebnisse der Brunnenformeln tendenziell niedriger als die Darcy-Versuchsergebnisse ausfielen. Dies könnte daran gelegen haben, dass die verwendeten Brunnenformeln hauptsächlich für Vertikalfilterbrunnen gedacht sind. Der Einfluss der Brunnenmantelfläche ist bei Vertikalfiltern beträchtlich und bei Schachtbrunnen nicht vorhanden. Durch den größeren Eintrittsquerschnitt (Mantelfläche) bei Vertikalfilterbrunnen ergibt sich, bei gleicher Förderrate wie bei einem Schachtbrunnen, eine niedrigere Durchsatzrate.

4.2.2 Hydrus 2D – inverse Modellierung – Ergebnisse

Durch die inverse Simulation konnten Ergebnisse erzielt werden, die einen Fehler von zirka einer Zehnerpotenz oder kleiner aufwiesen. Nur bei niedrigen Absenkstufen wichen die Ergebnisse drastisch vom Soll-Wert ab. Höhere Absenkstufen (größer als 30 cm) lieferten gute, mit den anderen Absenkstufen und dem Soll-Wert korrelierende, Durchsatzraten. Das Programm Hydrus 2D konnte somit, unter Anwendung der inversen Modellierung, für Fragestellungen an Schachtbrunnen als aussagekräftige Methode identifiziert werden.

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
$k_{s,soll}$ in $m*s^{-1}$	7,E-05	5,E-03
s in m	k_s in $m*s^{-1}$ mittels Hydrus 2D – inverse Modellierung	
0,30	1,E-02	1,E-01
0,55	1,E-04	1,E-03
0,75	7,E-05	8,E-04
0,85	7,E-05	8,E-04
1,00	8,E-05	7,E-04

Tabelle 13: Durchsatzraten für die Versuchsreihen 1 und 2 berechnet mittels Hydrus 2D – inverse Modellierung

Hingewiesen muss an dieser Stelle noch auf den als systematisch angenommenen Fehler bei der Berechnung der Durchsatzrate bei einer Absenkung von 0,3 m (Tabelle 13 (grau) bzw. Abbildung 20 und Abbildung 21) werden. Der Grund dafür, dass Hydrus 2D bei einer relativ geringen Absenkung kein plausibles Ergebnis berechnen konnte, blieb ungeklärt.

4.2.3 PMWIN – Ergebnisse

Die Durchsatzratenberechnung durch PEST (Parameter Estimator) erzielte sehr zufriedenstellende Ergebnisse (speziell Versuchsreihe 1) (Tabelle 14). Somit stellt auch PMWIN eine Auswertungsmöglichkeit für Pumpversuche an Schachtbrunnen dar.

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
$k_{s,soll}$ in $m*s^{-1}$	7,E-05	5,E-03
s in m	k_s in $m*s^{-1}$ PMWIN	
0,30	1,E-04	1,E-04
0,55	7,E-05	7,E-05
0,75	7,E-05	7,E-05
0,85	7,E-05	7,E-05
1,00	8,E-05	8,E-05

Tabelle 14: Durchsatzraten für die Versuchsreihen 1 und 2 berechnet mittels PMWIN

Bezüglich der Auswertung mit PMWIN ist anzumerken, dass es sich als sehr kompliziert erwies PEST handzuhaben. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Ergebnisse, durch mangelnde Kenntnis über das Programm PMWIN, als richtig berechnet interpretiert wurden, es aber nicht waren. Als eine aufwändigere, aber sicherere Variante, die Pumpversuche in PMWIN auszuwerten, erwies sich die händische Methode, bei welcher die Werte für die horizontale und vertikale Durchsatzrate sukzessive angepasst werden. Diese Methode wurde mit der Version PMWIN 5.33 durchgeführt und erzielte Ergebnisse die so gut waren, wie jene durch die Auswertung mit PMWIN 8 – PEST, jedoch nachvollziehbarer. Das Modell an sich war bei beiden Lösungswegen ident. Durch die Berechnung der Durchsatzraten mit PMWIN 8 – PEST und mit PMWIN 5.33 konnten die Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin überprüft werden.

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Beurteilung von Lösungsmethoden für die Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen. Zu diesem Zweck wurden Pumpversuche unter stationären Bedingungen an einem physischen Brunnenmodell, zur Schaffung einer redundanten Datengrundlage, geplant und durchgeführt. Neben der im Vorfeld definierten Modellgeometrie wurden während der durchgeführten Versuchsreihen die Förderströme bei beliebigen Absenkungen sowie die dazugehörigen Potenzialverteilungen im Bodenkörper erfasst.

Die Messung der Potenzialverteilungen in den Versuchsreihen 1 und 2 diente zur Kontrolle der angenommenen Bedingungen im physischen Brunnenmodell. Einerseits sollten die angenommen Randbedingungen für das physische Modell bestätigt werden, andererseits die laminaren Strömungsbedingungen überprüft werden. Die explizit dargestellten Potenzialnetze bestätigten ihre angenommene Charakteristik. Sowohl die angenommen Randbedingungen als auch die Gültigkeit von Darcy konnten bestätigt werden. Außerdem konnte ein systematischer Fehler in der Durchsatzrate zwischen dem Darcy-Versuch (Labor) und den Versuchen am physischen Brunnenmodell festgestellt werden. Dessen Auswirkung wurde als für die Auswertung vernachlässigbar klein angesehen, da die Berechnung der Durchsatzrate so und so schon an viele Prämissen geknüpft war.

Des weiteren konnte durch die Auswertung der Messergebnisse am physischen Brunnenmodell eine Beziehung zwischen dem als abhängig charakterisierten Parameter Q (Förderrate) und den als unabhängig angenommenen Parametern r (Brunnenradius), s (Absenkung), k_s (Durchsatzrate), mit dem Ziel eine Brunnenformel für die Auswertung der durchgeführten Pumpversuche zu generieren, hergestellt werden. Es konnte eine quadratische Beziehung zwischen r und Q , eine exponentielle Beziehung zwischen s und Q und eine potentielle Beziehung zwischen Q und k_s charakterisiert werden. Daraus ergab sich die nachfolgende Formel, die zumindest die Pumpversuche am physischen Brunnenmodell in einer ausreichenden Genauigkeit auswertbar machte.

$$Q = \frac{r^2 \pi \sqrt{k_s} s^{0,5}}{C}$$

(Formel: 28)

Q	in $m^3 \cdot s^{-1}$	Förderrate
r	in m	Brunnenradius, hier 0,1
k_s	in $m \cdot s^{-1}$	Durchsatzrate, hier $7E-05$ und $5E-03$
s	in m	Absenkung
C		Konstante, hier 12

Die Messergebnisse aus den Versuchsreihen 1, 2 und 3 dienten auch als Grundlage für die Pumpversuchsauswertung anhand von Brunnenformeln aus der Literatur. Dabei kamen Brunnenformeln zur Anwendung, die für die Auswertung eines Schachtbrunnenpumpversuchs nicht unbedingt gedacht sind. Diese Option bot sich durch den Fakt, dass keine adäquaten Brunnenformeln für Schachtbrunnen in der Literatur entdeckt werden konnten. Mit dem Ziel Ergebnisabweichungen besser interpretieren zu können, wurden die für die angewendeten Brunnenformeln gültigen Randbedingungen

erfasst. Die Ergebnisse streuten über fünf Zehnerpotenzen, was mit der damit korrelierenden Abweichung von den spezifischen Randbedingungen begründet werden konnte. Als Konfidenzintervall wurde eine Zehnerpotenz gewählt. Durch diesen Filter konnten einerseits einige instationäre Methoden (Methode der aufsteigenden Wassersäule (leicht abgeändert), Recoverytest nach Theis) als auch einige stationäre Methoden (Lamb, Faustformel 2) als geeignet für die Auswertung eines Schachtbrunnenversuchs identifiziert werden. Anzumerken ist jedoch noch, dass die Fehlerabweichung bei den verwendeten Formeln zwischen den Versuchsreihen 1 und 2 streute.

Die Auswertung der Schachtbrunnenpumpversuche durch die Simulationsprogramme Hydrus 2D und PMWIN 8 stellte sich als sehr praktikabel heraus. Weiters ist anzumerken, dass auch komplexe Feldbedingungen durch die beiden Softwarepakete modelliert werden können. Die Brunnenformeln mussten diesbezüglich eher mit Vorsicht verwendet werden, da sie auf homogene und isotrope Verhältnisse ausgelegt sind. Die besten Ergebnisse wurden mit der Parameter Schätzung durch den Solver PEST in PMWIN 8 und die händische Anpassung mit PMWIN 5.33, für die Versuchsreihen 1 und 2, erzielt. PMWIN erlaubte zusätzlich auch die komplexeste räumliche Diskretisierung. Nachteilig ist jedoch, dass PMWIN über keine rotationssymmetrische Berechnung verfügt, die bei Hydrus 2D vorhanden ist.

Die Ergebnisse aller Berechnungsmethode für die Versuchsreihen 1, 2 und 3 zur Auswertung von Pumpversuchen an einem Schachtbrunnen konnten somit folgendermaßen zusammengefasst werden. (Abbildung 20, Abbildung 21)

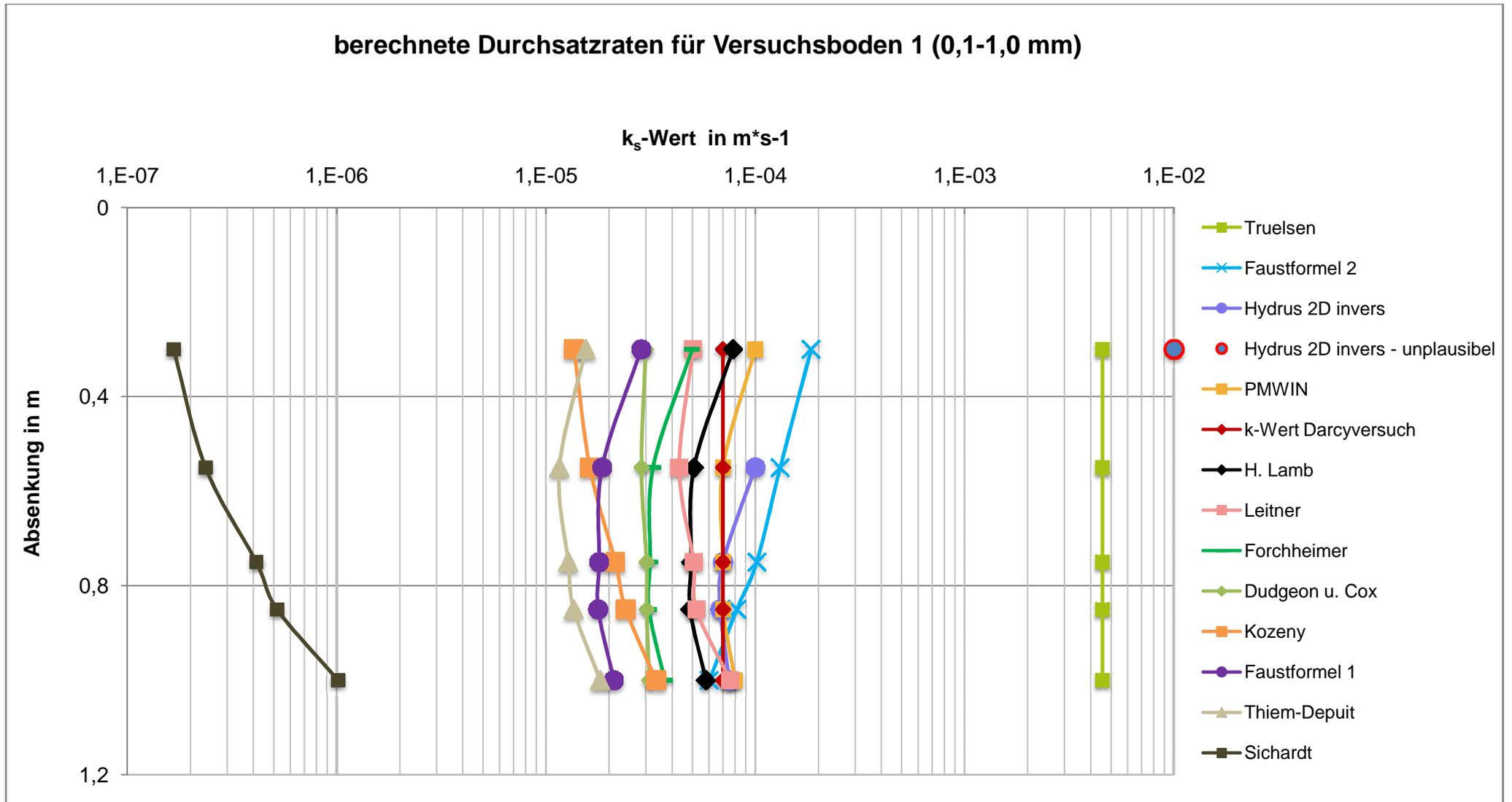


Abbildung 20: Ergebnisse der angewandten Methoden zur Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen (Versuchsboden 1)

berechnete Durchsatzraten für Versuchsboden 2 (0,7-1,2 mm)

k_s -Wert in $m \cdot s^{-1}$

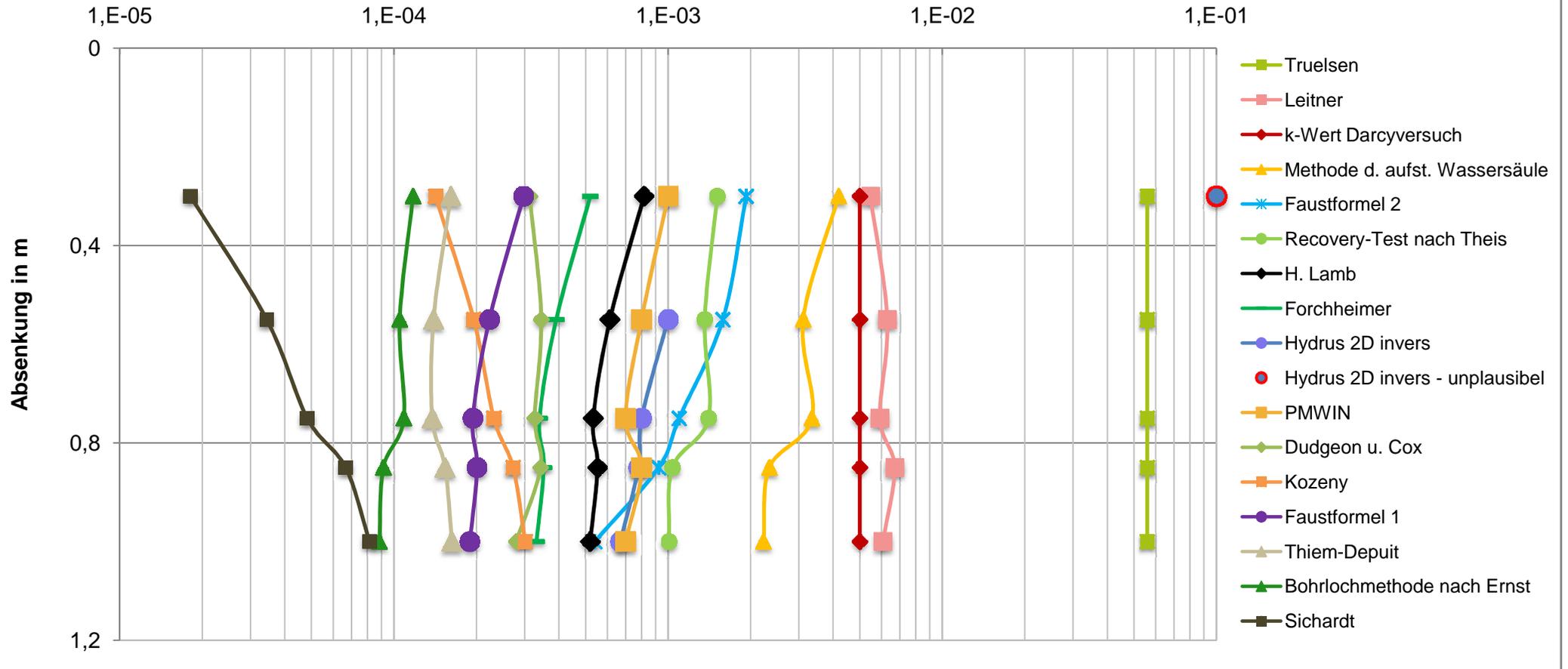


Abbildung 21: Ergebnisse der angewandten Methoden zur Auswertung von Pumpversuchen an Schachtbrunnen (Versuchsboden 2)

6 Literaturverzeichnis

- Bear, J. Verruijt A. (1987): Modeling groundwater flow and pollution. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Bear, J.; Bachmat, Y. (1991): Introduction to modeling of transport phenomena in porous media. Dordrecht ;, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Bieske, E. (1965): Handbuch des Brunnenbaus. Band 2. Grundlagen, Bohrbrunnen, Schachtbrunnen, Horizontalfilterbrunnen, Bohrungen, Grundwassermeßstellen, Grundwasserabsenkungen, Bohrphäle, Quelfassungen, Unfallverhütung, Rechtsfragen, Geschichtliches. 3 Bände. Berlin-Konradshöhe: Verlag Rudolf Schmidt.
- Bieske, E. (1965): Handbuch des Brunnenbaus. Band 1. Grundwasserkunde, Geräte, Baustoffe. 3 Bände. Berlin-Konradshöhe: Verlag Rudolf Schmidt.
- Bieske, E.; Rubbert, W.; Treskatis, C. (1998): Bohrbrunnen. Mit 35 Tabellen. 8. Aufl. München ;, Wien: Oldenbourg.
- Dudgeon, C. R.; Cox, R. J. (1977): Hydraulic design data for water wells in unconsolidated sediments. Canberra: Australian Govt. Pub. Service.
- Fürst, J. (2012): persönliche Mitteilung. Univ. Prof. am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) der Universität für Bodenkultur Wien.
- Hillel, D. (1998): Environmental soil physics. San Diego [u.a.]: Acad. Press.
- Hölting, B. (1980): Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie ; 26 Tabellen. Stuttgart: Enke.
- Kammerer, G. (1997): Berechnung der Zuströmung zu einem Bohrloch mit der Methode der finiten Elemente. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft.
- Kammerer, G. (2012): persönliche Mitteilung, Ass. Prof. am Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur Wien
- Kruseman, G. P.; de Ridder, N. A.; Verweij, J. M. (1991): Analysis and evaluation of pumping test data. 2. Aufl. Wageningen, Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Luckner, L.; Shestakov, V. M. (1986): Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich. 1. Aufl. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- Maleninsky, R. (1994): Hydraulische Untersuchungen der Strömungsverhältnisse in einem Aktivkohlefilter. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft.
- Nahrgang G. (1954): Zur Theorie des vollkommenen und unvollkommenen Brunnens. Technische Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Hydromechanik, Stauanlagen und Wasserversorgung.
- ÖNORM B 4400 (1978): Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen. Version vom 01.11.1978

ÖNORM L 1061-2 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden. Version vom 01.02.2002

Spiegel, M. R. (1990): Einführung in die höhere Mathematik. Theorie und Anwendung. Unter Mitarbeit von Christian Hipp. Nachdruck. Hamburg [etc.]: McGraw-Hill.

Spiegel, M. R.; Michel, R. (1977): Vektoranalysis. Theorie und Anwendung ; mit einer Einführung in die Tensoranalysis. Düsseldorf [u.a.]: McGraw-Hill.

UDATA (2004): Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushalts (FK, PWP, nFK, kapillarer Aufstieg). Unter Mitarbeit von E. Hangen und J. Scherzer. Hg. v. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). Bundesrepublik Deutschland. Bonn.

Verruyt, A. (1982): Theory of groundwater flow. 2. Aufl. London: Macmillan.

7 Anhang

7.1 Verzeichnis Anhang

- 7.2 Messnetz
- 7.3 Sieblinie
- 7.4 Gradienten beim Darcy-Versuch
- 7.5 Messprotokolle der stationären Pumpversuche (Versuchsreihe 1)
- 7.6 Aufbereitung der Messdaten (Versuchsreihe 1, 2 und 3)
- 7.7 Randbedingungen für die verwendeten Brunnenformeln
- 7.8 Auswertung der Brunnenformeln für die Versuchsreihen 1, 2 und 3

7.1.1 Tabellenverzeichnis

- Tabelle I: Koordinatenliste des Messnetzes
- Tabelle II: Siebprotokoll für Versuchsboden 1, Probe 3
- Tabelle III: Siebprotokoll für Versuchsboden 1, Probe 2
- Tabelle IV: Siebprotokoll für Versuchsboden 1, Probe 1
- Tabelle V: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K1/2
- Tabelle VI: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K2a/6
- Tabelle VII: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K5/8
- Tabelle VIII: Korrektur der Sieblinien um den Fehler des Kubiena-Mischers
- Tabelle IX: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K2/2
- Tabelle X: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K1/7
- Tabelle XI: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K6a/8
- Tabelle XII: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K7/9
- Tabelle XIII: Gradienten beim Darcy-Versuch
- Tabelle XIV: Potenzialhöhen der Versuchsreihe 1, Versuch 1-7
- Tabelle XV: Potenzialhöhen der Versuchsreihe 1, Versuch 8-14
- Tabelle XVI: Messdaten von Versuchsreihe 1 und 2
- Tabelle XVII: Aufbereitung der Rohdaten
- Tabelle XVIII: statistisch bereinigte Datengrundlage für die weitere Auswertung
- Tabelle XIX: Versuchsergebnisse des Recovery-Tests
- Tabelle XX: Datengrundlage für die Auswertung mittels ausgewählter Brunnenformeln
- Tabelle XXI: Auswertung Brunnenformeln Teil 1

Tabelle XXII: Auswertung Brunnenformeln Teil 2

Tabelle XXIII: Auswertung Brunnenformeln Teil 3

Tabelle XXIV: Ergebnisse der instationären Pumpversuchsauswertung (Recovery Tests)

7.1.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung I: Messnetz

7.2 Messnetz

Für die Messung der Potenzialhöhen am physikalischen Brunnenmodell war es notwendig ein Messnetz einzurichten. Dabei wurden die Messpunkte um den Brunnen verdichtet. Leider war es jedoch auf Grund des Bestandsmodells nicht möglich im Nahbereich der Brunnensohle bzw. darunter Messpunkte zu installieren. Somit kam es zur manuellen Interpolation bei der Auswertung der Messwerte. Das Messnetz bestand aus insgesamt 23 Messpunkten

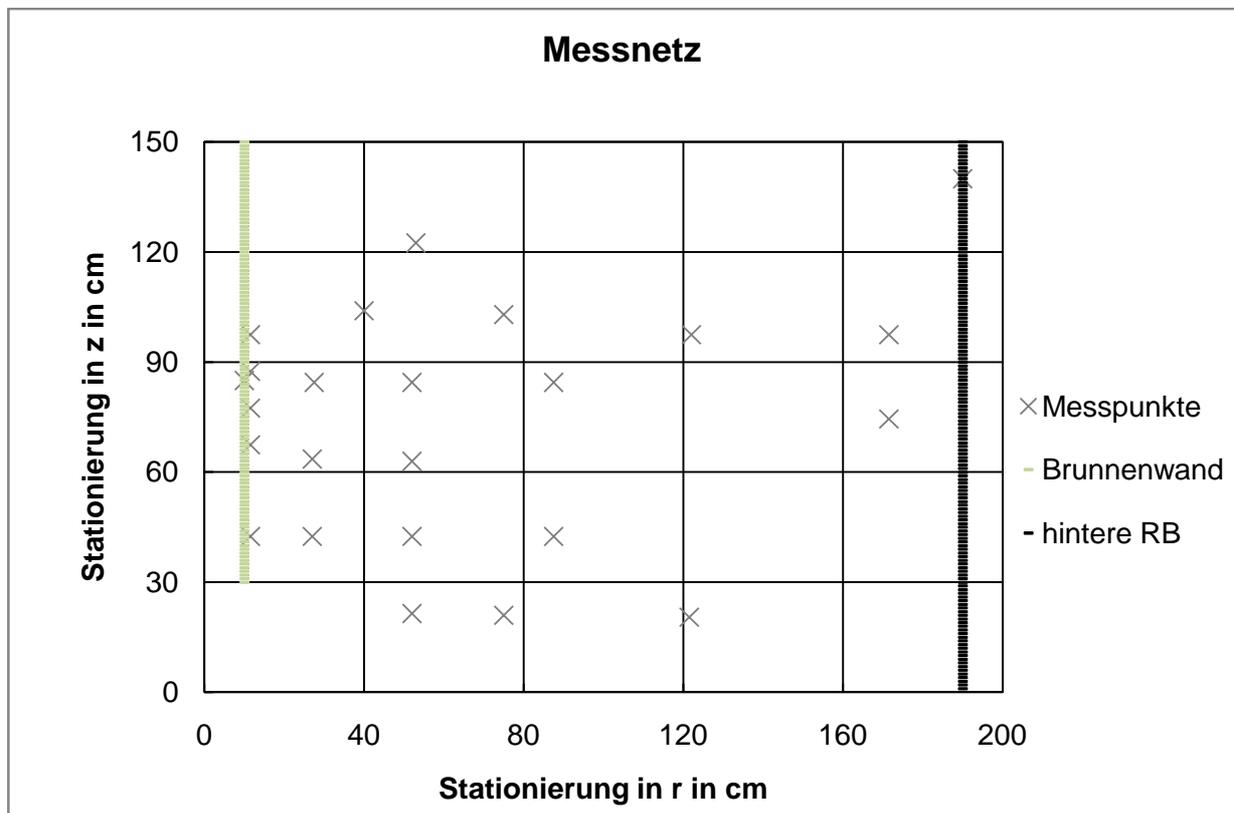


Abbildung I: Messnetz

Messpunkt Nr.	z in cm	r in cm
0	85,0	10,0

1	42,5	11,5
2	67,5	11,5
3	77,5	11,5
4	87,5	11,5
5	97,5	11,5
6	42,5	27,0
7	63,6	27,0
8	84,5	27,5
9	104,0	40,0
10	21,5	52,0
11	42,5	52,0
12	63,0	52,0
13	84,5	52,0
14	122,5	53,0
15	21,0	75,0
16	42,5	87,5
17	84,5	87,5
18	103,0	75,0
19	20,5	121,5
20	97,5	122,0
21	74,5	171,5
22	97,5	171,5
23	140,0	190,0

Tabelle I: Koordinatenliste des Messnetzes

7.3 Sieblinie

Die Ermittlung der Sieblinie setzte sich durch eine Nasssiebung für Körner $>0,063$ mm und einen Kubiena-Versuch für Körner $<0,063$ mm zusammen. Für jeden Versuchsboden wurden mindestens 3 Proben analysiert. (Tab. II bis Tab. XII)

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

Probennummer Labor:	Sand Brunnenmodell	analysiert am:	13.10.
Entnahmedaten:	3.Probe	Bearbeiter:	FF

FEINSIEBUNG

Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges} / g =$						20	Massenanteile	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p / \%$	100,0
<i>i</i>	SR	Schale	Masse Schale	Masse Siebrück-	Masse Schale + Boden lufttr.	Masse Siebrück-	$p / \%$	$2,0 > d \geq 1,0$	0,1	99,9	1,0		99,9
	$d_{gr\ i}$			stand (g) $m_{SR\ i} =$			$p[\text{Grobb.}] / \%$	$1,0 > d \geq 0,63$	0,1	99,8	0,63		99,8
	/mm	Nr.	$m_{Sch\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$		$=$	$0,63 > d \geq 0,20$	38,4	61,4	0,20		61,4
1	2,0					0,00	$100 \times m_{SR\ 2,0} / m_{ges}$	$0,20 > d \geq 0,125$	34,2	27,2	0,125		27,2
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						20,00	100,0	$0,125 > d \geq 0,063$	17,9	9,3	0,063		9,3
2	1,0	29a	41,98	42,00	0,02	0,02	$p[\text{Feinb.}] / \%$	$0,063 > d \geq 0,020$	8,6	0,7	0,020		0,7
3	0,63	37	41,02	41,04	0,02	0,02	$100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	$0,020 > d \geq 0,0063$	0,4	0,3	0,0063		0,3
4	0,20	77	51,93	59,61	7,68	7,68	Sandanteil	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,3	0,1	0,0020		0,1
5	0,125	190	40,51	47,35	6,84	6,84	$p[S]_s / \%$	$0,0020 > d$	0,1	0			0
6	0,063	14	60,89	64,47	3,58	3,58	$(\sum m_{SR}) / m_{s+w} =$	untere Fraktions-	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$				
Masse Sand $m[S]_s (g) = \sum m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$						18,14	90,7	grenze $d_{gr\ i} / mm$		Δp	d_i	$1/d_i$	$\Delta p/d_i$
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA								6,3	1,000		/mm	/mm ⁻¹	/mm ⁻¹
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ C$						21,0		2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000
								1,0	0,999	0,001	1,3333	0,75	0,001

*: = $5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{s+w}$

=															
Feinbodeneinwaage m_{s+w}/g					20	Masse Eindampf- rückstd (g) m_{PR}	Massen- anteile	0,63	0,998	0,001	0,7730	1,29	0,001		
i	PR $d_{gr\ i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i}/g$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$ -0,0266	$=$	$p/\%$	0,20	0,614	0,384	0,3036	3,29	1,265		
1	0,063	61	47,1852	47,2433	0,0315		100,0	0,063	0,093	0,179	0,0838	11,94	2,137		
2	0,020	62	48,1003	48,1297	0,0028		-7,9	0,020	0,007	0,086	0,0304	32,94	2,833		
3	0,0063	63	62,1045	62,1325	0,0014		92,1	0,0063	0,003	0,004	0,0096	104,37	0,365		
4	0,0020	64	48,22	48,2469	0,0003		$= p[S]_p / \%$	0,0020	0,001	0,003	0,0030	329,37	0,906		
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E/^\circ C =$					21,1		$p[S]_s - p[S]_p =$	0,001	0	0,001	0,0013	750,00	0,562		
							-1,4	$d_w / mm =$	0,0972	1,000		OVZ =	10		

Tabelle II: Siebprotokoll für Versuchsboden 1, Probe 3

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

Probennummer Labor:				Sand Brunnenmodell	analysiert am:	13.10.			$p[S]/\%$	86,9	$p[U]/\%$	13,1	$p[T]/\%$	0,0
Entnahmedaten:				2.Probe	Bearbeiter:	FF			Fraktions- anteil am	Summen	untere Fraktions- grenze	Fraktions- anteil	Summen	
FEINSIEBUNG							Fraktionsbereich	Gesamt- boden	$p[d < d_{gr\ i}]$ / %	100,0	$d_{gr\ i} / mm$	Fein- boden	Fein- boden $p/\%$	
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges}/g =$							20	Massenanteile	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p/\%$	100,0
i	SR $d_{gr\ i}$	Schale	Masse Schale	Masse Schale + Boden luftr.	Masse Siebrück- stand (g) $m_{SR\ i}$	$p/\%$	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	1,0	0,1	99,9	
							$p[Grobb.]/\%$	$2,0 > d \geq 1,0$	0,1	99,9	1,0	0,1	99,9	
								$1,0 > d \geq 0,63$	0,1	99,8	0,63	0,1	99,8	

		/mm	Nr.	$m_{Sch\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$100 \times m_{SR2,0} / m_{ges}$							
							0,0	$0,63 > d \geq 0,20$	36,9	63,0	0,20	36,9	63,0	
1		2,0				0,00	0,0	$0,20 > d \geq 0,125$	29,4	33,6	0,125	29,4	33,6	
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						20,00	100,0	$0,125 > d \geq 0,063$	20,5	13,2	0,063	20,5	13,2	
2		1,0	1	64,24	64,26	0,02	$p[Feinb.]/\%$	$0,063 > d \geq 0,020$	13,0	0,1	0,020	13,0	0,1	
3		0,63	46	70,97	70,99	0,02	$100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	$0,020 > d \geq 0,0063$	0,1	0,0	0,0063	0,1	0,0	
4		0,20	30a	60,15	67,52	7,37	Sandanteil	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,0	0,0	0,0020	0,0	0,0	
5		0,125	1a	49,33	55,20	5,87	$p[S]_s / \%$ $= 100 \times$	$0,0020 > d$	0,0	0		0,0	0	
6		0,063	58	45,52	49,61	4,09	$(\Sigma m_{SR}) / m_{s+w} =$	untere Fraktionsgrenze $d_{gr\ i} / mm$	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$					
Masse Sand $m[S]_s (g) = \Sigma m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$						17,37	86,9			Δp	d_i	$1/d_i$	$\Delta p/d_i$	
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA									6,3	1,000		/mm	/mm ⁻¹	/mm ⁻¹
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ C$ =			21,0	* : $= 5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{s+w}$					2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =			20	Masse Eindampf- rückstd (g) m_{PR} \neq $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i} / g$	Massen- anteile $p / \%$		1,0	0,999	0,001	1,3333	0,75	0,001	
i	PR $d_{gr\ i}$ /mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i} / g$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i} / g$				0,63	0,998	0,001	0,7730	1,29	0,001	
								0,20	0,630	0,369	0,3036	3,29	1,214	
								0,125	0,336	0,294	0,1538	6,50	1,908	
								0,063	0,132	0,205	0,0838	11,94	2,441	
1	0,063	41	47,6042	47,6665	0,0357	-8,9		0,020	0,001	0,130	0,0304	32,94	4,298	
2	0,020	42	47,8848	47,9118	0,0004	91,1		0,0063	0,000	0,001	0,0096	104,37	0,104	
3	0,0063	43	47,8511	47,8777	0,0000		$= p[S]_P / \%$	0,0020	0,000	0,000	0,0030	329,37	0,000	
4	0,0020	44	47,6104	47,6370	0,0000		$p[S]_s - p[S]_P =$	0,001	0	0,000	0,0013	750,00	0,000	
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E / ^\circ C =$						21,1	-4,2	$d_w / mm =$	0,1003	1,000		OVZ =	10	

Tabelle III: Siebprotokoll für Versuchsboden 1, Probe 2

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

						$p[S]/\%$	90,6	$p[U]/\%$	9,4	$p[T]/\%$	0,0
						Fraktionsbereich	Gesamt- boden $\Delta p/\%$	Summen- linie $p[d < d_{gr\ i}]/\%$	untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i}/mm$	Fraktions- anteil am Fein- boden $\Delta p/\%$	Summen- linie Fein- boden $p/\%$
FEINSIEBUNG						d in mm					
Probennummer Labor: Sand Brunnenmodell analysiert am: 13.10.											
Entnahmedaten: 1.Probe						Bearbeiter: FF					
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges}/g =$ 20						Massenanteile					
i	SR	Schale	Masse Schale	Masse Siebrück- stand (g) $m_{SR\ i} =$		$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0		
	$d_{gr\ i}$	Nr.	$m_{Sch\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$2,0 > d \geq 1,0$	0,1	100,0	1,0	0,1	100,0
	/mm					$1,0 > d \geq 0,63$	0,1	99,9	0,63	0,1	99,9
1	2,0				0,00	$0,63 > d \geq 0,20$	34,9	65,0	0,20	34,9	65,0
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$ 20,00						$0,20 > d \geq 0,125$	34,5	30,5	0,125	34,5	30,5
2	1,0	31	44,19	44,20	0,01	$0,125 > d \geq 0,063$	21,1	9,4	0,063	21,1	9,4
3	0,63	29	68,21	68,22	0,01	$0,063 > d \geq 0,020$	8,4	1,0	0,020	8,4	1,0
4	0,20	15	45,29	52,27	6,98	$0,020 > d \geq 0,0063$	0,7	0,3	0,0063	0,7	0,3
5	0,125	36	48,56	55,46	6,90	Sandanteil	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,3	0,0	0,0020	0,3
6	0,063	1009	42,14	46,35	4,21	$p[S]_s/\% =$ $100 \times$ $(\sum m_{SR})/m_{s+w} =$	$0,0020 > d$	0,0	0	0,0	0
Masse Sand $m[S]_s(g) = \sum m_{SR\ i} (i = 2...6) =$ 18,11						untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i}/mm$	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$				
							Δp	d_i	$1/d_i$	$\Delta p/d_i$	
						6,3	1,000	/mm	/mm ⁻¹	/mm ⁻¹	

PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA

Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ\text{C}$ =					21,0	*: = $5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{s+w}$	2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =					20		Masse Eindampf- rückstd (g) m_{PR} = $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$ -0,0266	1,0	1,000	0,001	1,3333	0,75
i	PR $d_{gr\ i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i} / \text{g}$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i} / \text{g}$		Massen- anteile $p / \%$	0,63	0,999	0,001	0,7730	1,29	0,001
							0,20	0,650	0,349	0,3036	3,29	1,149
							0,125	0,305	0,345	0,1538	6,50	2,243
							0,063	0,094	0,211	0,0838	11,94	2,513
1	0,063	51	48,2263	48,2886	0,0357	100,0	0,020	0,010	0,084	0,0304	32,94	2,775
2	0,020	52	47,9598	47,9905	0,0041	-8,9	0,0063	0,003	0,007	0,0096	104,37	0,783
3	0,0063	53	47,0259	47,0536	0,0011	91,1	0,0020	0,000	0,003	0,0030	329,37	0,823
4	0,0020	54	48,7391	48,7658	0,0001	= $p[S]_p / \%$	0,001	0	0,000	0,0013	750,00	0,187
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E / ^\circ\text{C}$ =					21,1	= $p[S]_s - p[S]_p =$ -0,5	$d_w / \text{mm} =$ 0,0955		1,000		OVZ = 10	

Tabelle IV: Siebprotokoll für Versuchsboden 1, Probe 1

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

Probennummer		Sand 0,7-1,2		analysiert am: 15.03.2012		$p[S] / \%$ 94,7		$p[U] / \%$ 4,7		$p[T] / \%$ 0,6	
Labor:						Fraktions- anteil am		Summen linie		Fraktions- anteil	
Entnahmedaten:		K1/2		Bearbeiter: SL		Gesamt- boden		$p[d < d_{gr\ i}]$ / %		untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i} / \text{mm}$	
FEINSIEBUN G						Fraktionsbereich				Fein- boden	
						d in mm		$\Delta p / \%$		Summen linie	
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges} / \text{g} =$				20,0002		Massenanteile		$d_{max} > d \geq 2,0$		$\Delta p / \%$	
								0,0		100,0	
								6,3		2,0	
								100,0		100,0	

i	SR $d_{gr\ i}$ /mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i}/g$	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\ i}/g$	Masse Siebrück- stand (g) $m_{SR\ i} =$ $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	p/%	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$						
							$2,0 > d \geq 1,0$	26,8	73,2	1,0	26,8	73,2	
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						20,00	100,0						
1	2,0				0,00	0,0	$1,0 > d \geq 0,63$	61,3	11,9	0,63	61,3	11,9	
						$100 \times m_{SR\ 2,0} / m_{ges}$	$0,63 > d \geq 0,20$	6,5	5,5	0,20	6,5	5,5	
2	1,0	25	39,92	45,28	5,36	p[Feinb.] / % =	$0,20 > d \geq 0,125$	0,1	5,3	0,125	0,1	5,3	
3	0,63	58	45,53	57,79	12,26		$100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	$0,125 > d \geq 0,063$	0,1	5,3	0,063	0,1	5,3
4	0,20	14	44,29	45,59	1,29	Sandanteil $p[S]_s / \% =$ $100 \times$	$0,063 > d \geq 0,020$	4,9	0,4	0,020	4,9	0,4	
5	0,125	54	49,27	49,30	0,02		$0,020 > d \geq 0,0063$	-0,6	1,0	0,0063	-0,6	1,0	
6	0,063	751	45,82	45,84	0,01	$(\Sigma m_{SR}) / m_{s+w} =$	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,4	0,6	0,0020	0,4	0,6	
Masse Sand $m[S]_s (g) = \Sigma m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$							18,95	94,7					
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA							untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i} / mm$		Δp	d_i /mm	$1/d_i$ /mm ⁻¹	$\Delta p/d_i$ /mm ⁻¹	
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ C$ =						21,0	6,3	1,000					
Feinbodeneinwaage $m_{s+w} / g =$						20	2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000	
							1,0	0,732	0,268	1,3333	0,75	0,201	
Masse Eindampf- rückstd (g) $m_{PR} =$ $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$							0,63	0,119	0,613	0,7730	1,29	0,793	
Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\ i} / g$							0,20	0,055	0,065	0,3036	3,29	0,213	
Massen- anteile p/%							0,125	0,053	0,001	0,1538	6,50	0,007	
-0,0266							0,063	0,053	0,001	0,0838	11,94	0,008	
100,0							0,020	0,004	0,049	0,0304	32,94	1,614	
-0,6							0,0063	0,010	-0,006	0,0096	104,37	-0,652	
99,4							0,0020	0,006	0,004	0,0030	329,37	1,482	
= $p[S]_p / \% =$							0,001	0	0,006	0,0013	750,00	4,125	
0,0026							$d_w / mm =$		0,1284	1,000	OVZ =		8
0,0015													
0,0040													
0,0022													
= $p[S]_s - p[S]_p =$													
-4,6													
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E / ^\circ C =$						21,1							

Tabelle V: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K1/2

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

						$p[S]/\%$	93,8	$p[U]/\%$	5,7	$p[T]/\%$	0,5	
						Fraktionsanteil am	Summenlinie	untere Fraktionsgrenze	Fraktionsanteil am Feinboden	Summenlinie		
						Gesamtboden	$p[d < d_{gr\ i}]/\%$	$d_{gr\ i}/\text{mm}$	Feinboden	Feinboden		
						$\Delta p/\%$	100,0	6,3				
						Fraktionsbereich						
						d in mm						
Probennummer Labor:		Sand 0,7-1,2		analysiert am:		15.03.2012						
Entnahmedaten:		K2a/6		Bearbeiter:		SL						
FEINSIEBUN G												
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges}/g =$						20,0028						
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						20,00						
i	SR $d_{gr\ i}$ /mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i}/g$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i}/g$	Masse Siebrück- stand (g) $m_{SR\ i} =$ $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	Massenanteile $p/\%$	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p/\%$	100,0
1	2,0				0,00	$p[\text{Grobb.}]/\% =$ $100 \times m_{SR\ 2,0}/m_{ges}$	$2,0 > d \geq 1,0$	23,9	76,1	1,0		23,9
2	1,0	3	49,1612	53,9451	4,78	$p[\text{Feinb.}]/\% =$ $100 \times m_{s+w}/m_{ges}$	$1,0 > d \geq 0,63$	62,6	13,5	0,63		62,6
3	0,63	1	44,9358	57,4529	12,52		$0,63 > d \geq 0,20$	7,1	6,4	0,20		7,1
4	0,20	64a	51,6068	53,0299	1,42		$0,20 > d \geq 0,125$	0,1	6,3	0,125		0,1
5	0,125	6	44,3029	44,3265	0,02		$0,125 > d \geq 0,063$	0,1	6,2	0,063		0,1
6	0,063	37a	41,0237	41,0457	0,02		$0,063 > d \geq 0,020$	5,8	0,4	0,020		5,8
Masse Sand $m[S]_S (g) = \sum m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$						18,77						
						$(\sum m_{SR})/m_{s+w} =$	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,4	0,5	0,0020		0,4
						$p[S]_S/\% =$ $100 \times$	$0,0020 > d$	0,5	0			0,5
						untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i}/\text{mm}$	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}]/m_{ges}$					
							Δp	d_i /mm	$1/d_i$ /mm ⁻¹	$\Delta p/d_i$ /mm ⁻¹		
							6,3	1,000				

PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA													
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ\text{C}$		21,0		* : = $5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{S+W}$		2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000		
Feinbodeneinwaage $m_{S+W} / \text{g} =$		20,0028		Masse Eindampf-	Massen-	1,0	0,761	0,239	1,3333	0,75	0,179		
i	PR $d_{gr\ i}$ /mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i} / \text{g}$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+S+W\ i} / \text{g}$	rückstd (g) $m_{PR} =$ $m_{Sch+S+W\ i} - m_{Sch\ i}$ -0,0266								
						anteile	0,63	0,135	0,626	0,7730	1,29	0,810	
						$p / \%$	0,20	0,064	0,071	0,3036	3,29	0,234	
						100,0	0,125	0,063	0,001	0,1538	6,50	0,008	
						-0,2	0,063	0,062	0,001	0,0838	11,94	0,013	
1	0,063	74	57,8807	57,9082	0,0009	-0,2	0,020	0,004	0,058	0,0304	32,94	1,899	
2	0,020	22	46,206	46,2342	0,0016	99,8	0,0063	0,008	-0,004	0,0096	104,37	-0,470	
3	0,0063	23	44,1113	44,1413	0,0034	= $p[S]_P / \%$	0,0020	0,005	0,004	0,0030	329,37	1,235	
4	0,0020	27	71,1421	71,1706	0,0019	$p[S]_S - p[S]_P =$	0,001	0	0,005	0,0013	750,00	3,562	
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E / ^\circ\text{C} =$					21,1	-5,9	$d_w / \text{mm} =$		0,1339	1,000	OVZ =		7

Tabelle VI: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K2a/6

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

						$p[S] / \%$	96,2	$p[U] / \%$	3,3	$p[T] / \%$	0,5	
						Fraktions-	Summen	untere	Fraktions-	Summen		
						anteil am	linie	Fraktions-	anteil	linie		
						Gesamt-	$p[d < d_{gr\ i}]$	grenze	am	Fein-		
						boden	/ %	$d_{gr\ i} / \text{mm}$	Fein-	boden		
						Fraktionsbereich	$\Delta p / \%$	100,0	6,3	boden	$p / \%$	
						d in mm						
						$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p / \%$	100,0	
						$2,0 > d \geq 1,0$	21,2	78,8	1,0		21,2	78,8
Probennummer		Sand 0,7-1,2		analysiert am: 15.03.2012								
Labor:				Bearbeiter: SL								
Entnahmedaten:		K5/8										
FEINSIEBUN G												
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges} / \text{g} =$				20,0062		Massenanteile						
i	SR	Schale	Masse	Masse Schale	Masse	$p / \%$						

	$d_{gr\ i}$ /mm	Nr.	Schale $m_{Sch\ i}/g$	+ Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i}/g$	Siebrück- stand (g) $m_{SR\ i} =$ $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$p[\text{Grob.}] / \%$ = $100 \times m_{SR2,0} / m_{ges}$							
					0,00	0,0	1,0 > $d \geq 0,63$	66,1	12,7	0,63	66,1	12,7	
							0,63 > $d \geq 0,20$	8,6	4,1	0,20	8,6	4,1	
1	2,0						0,20 > $d \geq 0,125$	0,1	3,9	0,125	0,1	3,9	
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						20,01							
						100,0	0,125 > $d \geq 0,063$	0,1	3,8	0,063	0,1	3,8	
2	1,0	85	53,8057	58,0517	4,25	$p[\text{Fein.}] / \%$ =	0,063 > $d \geq 0,020$	3,3	0,5	0,020	3,3	0,5	
3	0,63	2AB	49,9702	63,1869	13,22	$100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	0,020 > $d \geq 0,0063$	-0,1	0,6	0,0063	-0,1	0,6	
4	0,20	89	47,7901	49,5182	1,73	Sandanteil	0,0063 > $d \geq$ 0,0020	0,1	0,5	0,0020	0,1	0,5	
5	0,125	31	46,8965	46,9265	0,03	$p[S]_S / \%$ = 100x	0,0020 > d	0,5	0		0,5	0	
6	0,063	53d	62,7508	62,7675	0,02	$(\sum m_{SR}) / m_{s+w} =$	untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i} / mm$						
Masse Sand $m[S]_S (g) = \sum m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$						19,24	96,2	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$					
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA									Δp	d_i /mm	$1/d_i$ /mm ⁻¹	$\Delta p/d_i$ /mm ⁻¹	
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ C$ =		21,0		*: = $5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{s+w}$				6,3	1,000				
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =		20,0062		Masse Eindampf- rückstd (g) m_{PR} =		Massen- anteile $p / \%$		2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000
i	PR $d_{gr\ i}$ /mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i} / g$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$			0,63	0,127	0,661	0,7730	1,29	0,855
					-0,0266	100,0		0,20	0,041	0,086	0,3036	3,29	0,284
1	0,063	66	45,8313	45,8598	0,0019	-0,5		0,125	0,039	0,001	0,1538	6,50	0,010
2	0,020	11	44,8178	44,8465	0,0021	99,5		0,063	0,038	0,001	0,0838	11,94	0,010
3	0,0063	64b	61,5873	61,6165	0,0026	= $p[S]_P / \%$		0,020	0,005	0,033	0,0304	32,94	1,093
4	0,0020	63	49,1841	49,2128	0,0021	$p[S]_S - p[S]_P =$		0,0063	0,006	-0,001	0,0096	104,37	-0,130
								0,0020	0,005	0,001	0,0030	329,37	0,412
								0,001	0	0,005	0,0013	750,00	3,936

Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E/^\circ\text{C} = 21,1$

-3,4

$d_w / \text{mm} = 0,1509$

1,000

OVZ = 7

Tabelle VII: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K5/8

Korrektur der Sieblinien um den Fehler des Kubiena-Mischers

Rückstand Spühlbecher

	Schale Nr.	msch [g]	msch+mp [g]	mp [g]				
	3	49,164	51,8639	2,6999				
Probenrest in Absetzzylinder	22	51,5008	51,6401	0,1393				
Absetzzylinder Nr.	Schale Nr.	msch [g]	msch+mp [g]	mp [g]	Σ mkubiena [g]	mp gesamt [g]	mp gesamt soll [g]	fehler mp gesamt [g]
7	22x	46,2069	64,6893	18,4824	0,0060	18,4884	20,0008	1,5124
8	74	57,8807	76,8923	19,0116	0,0051	19,0167	20,0023	0,9856
9	30	44,31	63,2798	18,9698	0,0050	18,9748	20,0025	1,0277
							Σ fehler mp gesamt [g]	3,5257
							Rückstand Spühl + Absetz	2,8392
							Abweichung vom Fehler	0,6865
							Abweichung in %	19

Korrektur der Nasssiebung 1. Messreihe, da nur bei 1. Messreihe nach Kubiena eine Nasssiebung durchgeführt wurde

Fehler gesamt 2,8392

Fehler je Probe 0,9464

Aufteilung des Fehlers nach Kornverteilung vor Fehlerkorrektur

mpi [g] 20,0

Fehleranteil [%] 4,7

Sieblinie vor Korrektur K1-2 K2a-6 K5-8

dk [mm] Summenlinie Fraktionsanteil [%]

1 26,80 23,92 21,22

0,63 61,29 62,58 66,06

0,2 6,46 7,11 8,64

0,125 0,11 0,12 0,15

0,063 0,07 0,11 0,08

94,73 93,84 96,16

Sieblinie nach Korrektur K1-2 K2a-6 K5-8

dk [mm] Fraktionsanteil [%]

2 0 0 0

1 28,14 25,12 21,85

0,63 64,35 65,73 68,02

Summenlinie			
	K1-2	K2a-6	K5-8
dk [mm]	Fraktionsanteil [%]		
2	100	100	100
1	71,86	74,88	78,15
0,63	7,51	9,15	10,13

0,2	6,78	7,47	8,89	0,2	0,73	1,67	1,24
0,125	0,11	0,12	0,15	0,125	0,62	1,55	1,09
0,063	0,07	0,12	0,09	0,063	0,54	1,43	1,00
0	0,00	0,00	0,00	0,002	0,01	0,01	0,01
	99,46	98,57	99,00				
soll nach Korrektur	99,46	98,57	100,89				
	0,65	0,22	0,47				

$\leq 0,063\text{m}$ ist der max. Wert beim Kubienaversuch herangezogen worden, da es beim Kubiena zu irgendeinem Fehler kommt bzw. ungenau gewogen wurde. Die Sieblinie steigt daher zwischen 0 und 0,063 linear an.

Tabelle VIII: Korrektur der Sieblinien um den Fehler des Kubiena-Mischers

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

						Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:					
						$p[S]/\%$ 98,3		$p[U]/\%$ 1,7		$p[T]/\%$ 0,0	
						Fraktionsanteil am Gesamtboden	Summenlinie	untere Fraktionsgrenze	Fraktionsanteil am Feinboden	Summenlinie	
						Fraktionsbereich	$p[d < d_{gr\ i}]/\%$	$d_{gr\ i}/\text{mm}$			
						d in mm	$\Delta p/\%$	100,0	6,3	boden	$p/\%$
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges}/g =$ 100,0036						Massenanteile	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p/\%$
i	SR	Schale	Masse	Masse Schale	Masse	$p/\%$	$2,0 > d \geq 1,0$	25,0	75,0	1,0	25,0
											75,0

	$d_{gr\ i}$ /mm	Nr.	Schale $m_{Sch\ i}/g$	+ Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i}/g$	Siebrück- stand (g) $m_{SR\ i} =$ $m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$p[\text{Grob.}] / \%$ = $100 \times m_{SR2,0} / m_{ges}$							
					0,00	0,0	1,0 > $d \geq 0,63$	67,2	7,9	0,63	67,2	7,9	
							0,63 > $d \geq 0,20$	6,1	1,7	0,20	6,1	1,7	
1	2,0						0,20 > $d \geq 0,125$	0,0	1,7	0,125	0,0	1,7	
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						100,00							
						100,0	0,125 > $d \geq 0,063$	0,0	1,7	0,063	0,0	1,7	
2	1,0	54	49,27	74,26	24,99	$p[\text{Fein.}] / \%$ = $100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	0,063 > $d \geq 0,020$	1,7	0,0	0,020	1,7	0,0	
3	0,63	89	47,79	114,95	67,16		0,020 > $d \geq 0,0063$	0,0	0,0	0,0063	0,0	0,0	
4	0,20	61	52,83	58,95	6,11	Sandanteil	0,0063 > $d \geq$ 0,0020	0,0	0,0	0,0020	0,0	0,0	
5	0,125	85	53,81	53,82	0,01	$p[S]_s / \%$ = 100x	0,0020 > d	0,0	0		0,0	0	
6	0,063	58	45,53	45,54	0,01	$(\sum m_{SR}) / m_{s+w} =$	untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i} / mm$						
Masse Sand $m[S]_s (g) = \sum m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$						98,28	98,3	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$					
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA													
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ C$ =				21,0	* : = $5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{s+w}$			6,3	1,000				
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =				100,00	Masse Eindampf- rückstd (g) m_{PR} =	Massen- anteile $p / \%$	2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000	
i	PR $d_{gr\ i}$ /mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\ i} / g$	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$ -0,0266		0,63	0,079	0,672	0,7730	1,29	0,869	
						100,0	0,20	0,017	0,061	0,3036	3,29	0,201	
							0,125	0,017	0,000	0,1538	6,50	0,001	
							0,063	0,017	0,000	0,0838	11,94	0,001	
1	0,063				0,0052		0,020	0,000	0,017	0,0304	32,94	0,567	
2	0,020						0,0063	0,000	0,000	0,0096	104,37	0,000	
3	0,0063						0,0020	0,000	0,000	0,0030	329,37	0,000	

4	0,0020				$\rho[S]_S - \rho[S]_P =$	0,001	0	0,000	0,0013	750,00	0,000	
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E/^\circ\text{C} =$					21,1	-1,5	$d_w / \text{mm} =$	0,5475	1,000		OVZ =	2

Tabelle IX: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K2/2

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

						$\rho[S] / \%$	0,0	$\rho[U] / \%$	99,7	$\rho[T] / \%$	0,3		
						Fraktions- anteil am Gesamt- boden	Summen - linie $\rho[d < d_{gr,i}]$ / %	untere Fraktions- grenze $d_{gr,i} / \text{mm}$	Fraktions- anteil am Fein- boden	Summen - linie Fein- boden $\rho / \%$			
						Fraktionsbereich	$\Delta p / \%$	100,0	6,3	boden	$\Delta p / \%$	100,0	
						d in mm							
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges} / \text{g} =$						20,0008	Massenanteile	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	0,0	100,0
i	SR	Schale	Masse	Masse Schale	Masse Siebrück-	$p / \%$	$2,0 > d \geq 1,0$	0,0	100,0	1,0	0,0	100,0	
	$d_{gr,i}$		Schale	+ Boden luftr.	stand (g) $m_{SR,i} =$	$\rho[\text{Grobb.}] / \%$	$1,0 > d \geq 0,63$	0,0	100,0	0,63	0,0	100,0	
	/mm	Nr.	$m_{Sch,i} / \text{g}$	$m_{Sch+s+w,i} / \text{g}$	$m_{Sch+s+w,i} - m_{Sch,i}$	$=$ $100 \times m_{SR2,0} / m_{ges}$	$0,63 > d \geq 0,20$	0,0	100,0	0,20	0,0	100,0	
1	2,0				0,00	0,0	$0,20 > d \geq 0,125$	0,0	100,0	0,125	0,0	100,0	
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR,2,0} =$						100,0	$0,125 > d \geq 0,063$	0,0	100,0	0,063	0,0	100,0	
2	1,0				0,00	$\rho[\text{Feinb.}] / \%$	$0,063 > d \geq 0,020$	99,8	0,2	0,020	99,8	0,2	
3	0,63				0,00	$100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	$0,020 > d \geq 0,0063$	-0,2	0,4	0,0063	-0,2	0,4	
4	0,20				0,00	Sandanteil	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,1	0,3	0,0020	0,1	0,3	
5	0,125				0,00	$\rho[S]_S / \%$	$0,0020 > d$	0,3	0		0,3	0	

6	0,063					100x (Σm_{SR})/ m_{s+w} =									
Masse Sand $m[S]_S$ (g) = $\Sigma m_{SR i}$ (i = 2...6) =						0,00	0,0	untere Fraktionsgrenze $d_{gr i}$ / mm							
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA												Summenlinie $p[d < d_{gr i}] = m[d < d_{gr i}] / m_{ges}$			
Susp.temp. zu Beginn t_A / °C =						21,0	*	Δp	d_i	$1/d_i$	$\Delta p/d_i$				
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =						20,00			/ mm	/ mm ⁻¹	/ mm ⁻¹				
<i>i</i>	PR $d_{gr i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch i}$ / g	Masse Schale + Boden luftr. $m_{Sch+s+w i}$ / g	Masse Eindampf- rückstd (g) m_{PR} = $m_{Sch+s+w i} - m_{Sch i}$ -0,0266	Massen- anteile p / %									
1	0,063	751	45,8236	45,8524	0,0022	100,0	6,3	1,000							
2	0,020	53d	62,7512	62,7787	0,0009	-0,5	2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000			
3	0,0063	31	46,8966	46,9249	0,0017	99,5	1,0	1,000	0,000	1,3333	0,75	0,000			
4	0,0020	11	44,818	44,8458	0,0012	$p[S]_P$ / %	0,63	1,000	0,000	0,7730	1,29	0,000			
Susp.temperatur nach der Pipettierung t_E / °C =						21,1		0,20	1,000	0,000	0,3036	3,29	0,000		
							0,125	1,000	0,000	0,1538	6,50	0,000			
							0,063	1,000	0,000	0,0838	11,94	0,000			
							0,020	0,002	0,998	0,0304	32,94	32,862			
							0,0063	0,004	-0,002	0,0096	104,37	-0,209			
							0,0020	0,003	0,001	0,0030	329,37	0,412			
							0,001	0	0,003	0,0013	750,00	2,250			
							d_w / mm =		0,0283	1,000	OVZ =		35		

Tabelle X: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K1/7

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

				$p[S] / \% =$ 0,0		$p[U] / \%$ 99,7		$p[T] / \%$ 0,3	
				Fraktions- anteil am Gesamt-	Summen- linie $p[d < d_{gr i}]$	untere Fraktions- grenze	Fraktions- anteil am	Summen- linie Fein-	
Probennummer Labor:	Sand 0,7-1,2	analysiert am:	19.3.						
Entnahmedaten:	K6a/8	Bearbeiter:	SL						

FEINSIEBUN G						Fraktionsbereich	boden	/%	$d_{gr\ i}/mm$	Fein-	boden	
						d in mm	$\Delta p/\%$	100,0	6,3	boden	$p/\%$	
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges}/g =$ 20,0023						Massenanteile	$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p/\%$	100,0
i	SR	Schale	Masse	Masse Schale	Masse Siebrück-	$p/\%$	$2,0 > d \geq 1,0$	0,0	100,0	1,0	0,0	100,0
	$d_{gr\ i}$		Schale	+ Boden luftr.	stand (g) $m_{SR\ i} =$		$p[\text{Grob.}]/\%$	$1,0 > d \geq 0,63$	0,0	100,0	0,63	0,0
	/mm	Nr.	$m_{Sch\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$=$	$0,63 > d \geq 0,20$	0,0	100,0	0,20	0,0	100,0
1	2,0				0,00	$100 \times m_{SR2,0}/m_{ges}$	$0,20 > d \geq 0,125$	0,0	100,0	0,125	0,0	100,0
						0,0						
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$ 20,00						100,0	$0,125 > d \geq 0,063$	0,0	100,0	0,063	0,0	100,0
2	1,0				0,00	$p[\text{Fein.}]/\% =$	$0,063 > d \geq 0,020$	99,7	0,3	0,020	99,7	0,3
3	0,63				0,00	$100 \times m_{s+w}/m_{ges}$	$0,020 > d \geq 0,0063$	-0,1	0,4	0,0063	-0,1	0,4
4	0,20				0,00	Sandanteil	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,1	0,3	0,0020	0,1	0,3
5	0,125				0,00	$p[S]_s/\% =$	$0,0020 > d$	0,3	0		0,3	0
6	0,063				0,00	$(\Sigma m_{SR})/m_{s+w} =$	untere Fraktions-	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}]/m_{ges}$				
Masse Sand $m[S]_s (g) = \Sigma m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$ 0,00						0,0	grenze $d_{gr\ i}/mm$	Δp	d_i	$1/d_i$	$\Delta p/d_i$	
							6,3	1,000	/mm	/mm ⁻¹	/mm ⁻¹	
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA							2,0	1,000	0,000	3,0361	0,33	0,000
Susp.temp. zu Beginn $t_A/^\circ C$			=	21,0	*: $= 5000 \times m_{PR\ 0,063}/m_{s+w}$		1,0	1,000	0,000	1,3333	0,75	0,000
Feinbodeneinwaage m_{s+w}/g			=	20,00	Masse	Massen-	0,63	1,000	0,000	0,7730	1,29	0,000
					Eindampf-		anteile	0,20	1,000	0,000	0,3036	3,29
i	PR	Schale	Masse	Masse Schale	rückstd (g) m_{PR}	$p/\%$		0,125	1,000	0,000	0,1538	6,50
	$d_{gr\ i}$		Schale	+ Boden luftr.	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$							

	/mm	Nr.	$m_{Sch\ i}/g$	$m_{Sch+s+w\ i}/g$	-0,0266	100,0	0,063	1,000	0,000	0,0838	11,94	0,000
1	0,063	64b	61,5874	61,615	0,0010	-0,2	0,020	0,003	0,997	0,0304	32,94	32,829
2	0,020	2AB	49,9705	49,9984	0,0013	99,8	0,0063	0,004	-0,001	0,0096	104,37	-0,078
3	0,0063	14	44,2936	44,3218	0,0016	$= p[S]_P / \%$	0,0020	0,003	0,001	0,0030	329,37	0,329
4	0,0020	27	71,1423	71,1701	0,0012	$p[S]_S - p[S]_P =$	0,001	0	0,003	0,0013	750,00	2,250
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E/^\circ C =$					21,1	-99,8	$d_w / mm =$ 0,0283		1,000		OVZ = 35	

Tabelle XI: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K6a/8

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

						$p[S] / \%$ =	0,0	$p[U] / \%$	99,8	$p[T] / \%$	0,2						
						Fraktions- anteil am Gesamt- boden	Summen- linie $p[d < d_{gr\ i}]$ / %	untere Fraktions- grenze $d_{gr\ i} / mm$	Fraktions- anteil am Fein- boden	Summen- linie Fein- boden $p / \%$							
						Fraktionsbereich	$\Delta p / \%$	100,0	6,3	$\Delta p / \%$	100,0						
						d in mm											
Masse lufttrockene Bodeneinwaage $m_{ges} / g =$						20,0025	Massenanteile					$d_{max} > d \geq 2,0$	0,0	100,0	2,0	$\Delta p / \%$	100,0
i	SR	Schale	Masse	Masse Schale	Masse Siebrück-	$p / \%$	$2,0 > d \geq 1,0$	0,0	100,0	1,0	0,0	100,0					
	$d_{gr\ i}$		Schale	+ Boden luftr.	stand (g) $m_{SR\ i} =$	$p[\text{Grobb.}] / \%$	$1,0 > d \geq 0,63$	0,0	100,0	0,63	0,0	100,0					
	/mm	Nr.	$m_{Sch\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$=$ $100 \times m_{SR\ 2,0} / m_{ges}$	$0,63 > d \geq 0,20$	0,0	100,0	0,20	0,0	100,0					
1	2,0				0,00	0,0	$0,20 > d \geq 0,125$	0,0	100,0	0,125	0,0	100,0					
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\ 2,0} =$						20,00	100,0	$0,125 > d \geq 0,063$	0,0	100,0	0,063	0,0	100,0				
2	1,0				0,00	$p[\text{Feinb.}] / \%$	$0,063 > d \geq 0,020$	99,7	0,3	0,020	99,7	0,3					

3	0,63				0,00	$100 \times m_{s+w} / m_{ges}$	$0,020 > d \geq 0,0063$	-0,1	0,3	0,0063	-0,1	0,3
4	0,20				0,00	Sandanteil	$0,0063 > d \geq 0,0020$	0,1	0,2	0,0020	0,1	0,2
5	0,125				0,00	$p[S]_s / \% = 100 \times$	$0,0020 > d$	0,2	0		0,2	0
6	0,063				0,00	$(\Sigma m_{SR}) / m_{s+w} =$	untere Fraktionsgrenze $d_{gr\ i} / \text{mm}$	Summenlinie $p[d < d_{gr\ i}] = m[d < d_{gr\ i}] / m_{ges}$				
Masse Sand $m[S]_s (g) = \Sigma m_{SR\ i} (i = 2 \dots 6) =$					0,00	0,0		Δp	d_i	$1/d_i$	$\Delta p/d_i$	
PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA												
Susp.temp. zu Beginn $t_A / ^\circ\text{C}$				=	21,0	* : $= 5000 \times m_{PR\ 0,063} / m_{s+w}$						
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g				=	20,00	Masse Eindampfrückstd (g) m_{PR}	Massenanteile					
i	PR	Schale	Masse Schale	Masse Schale + Boden luftr.	$m_{Sch+s+w\ i} - m_{Sch\ i}$	$p / \%$						
	$d_{gr\ i} / \text{mm}$	Nr.	$m_{Sch\ i} / g$	$m_{Sch+s+w\ i} / g$	-0,0266	100,0						
1	0,063	64a	51,6066	51,6347	0,0015	-0,4	0,020	0,003	0,997	0,0304	32,94	32,846
2	0,020	12	44,9354	44,9631	0,0011	99,6	0,0063	0,003	-0,001	0,0096	104,37	-0,078
3	0,0063	6	44,3036	44,3316	0,0014	$= p[S]_P / \%$	0,0020	0,002	0,001	0,0030	329,37	0,329
4	0,0020	22	51,5088	51,5364	0,0010	$p[S]_s - p[S]_P =$	0,001	0	0,002	0,0013	750,00	1,875
Susp.temperatur nach der Pipettierung $t_E / ^\circ\text{C} =$					21,1	-99,6	$d_w / \text{mm} =$	0,0286	1,000		OVZ =	35

Tabelle XII: Siebprotokoll für Versuchsboden 2, Probe K7/9

7.4 Gradienten beim Darcy-Versuch

Die Gradienten wurden für jeden der fünf Darcy-Versuche berechnet um sie mit den Gradienten im physikalischen Brunnenmodell zu vergleichen.

Versuch Nr.	grad H	q in m*s-1	re
1	1,02	5,8E-06	2,7E-04
2	1,34	8,3E-06	3,8E-04
3	1,6	9,4E-06	4,3E-04
4	1,88	1,1E-05	4,9E-04
5	1,85	1,1E-05	4,9E-04
6	2	1,2E-05	5,3E-04

Tabelle XIII: Gradienten beim Darcy-Versuch

7.5 Messprotokolle der stationären Pumpversuche (Versuchsreihe 1)

Teilweise wurden bei den Messprotokollen zusätzliche Messpunkte (Nummer beginnend mit „z“) definiert. Dies diente der Glättung der digitalen Darstellung mit Surfer 9.

Versuch Nr.			1	2	3	4	5			6	7		
Messpunkt Nr.	z (cm)	r (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	z (cm)	r (cm)	H (cm)	H (cm)	z (cm)	r (cm)	H (cm)
z1							40	11,5	130		40	11,5	115
z2							35	11,5	125		35	11,5	95
z3							32	11,5	120		32	11,5	80
z4							30	11,5	115		30	11,5	70
z5							25	0,0	125		25	0,0	95
z6							25	11,5	120		25	11,5	80
z7							0	160,0	140		0	190,0	140
z8							30	0,0	110		30	0,0	55
0	30,0	10,0	85,0	65,0	55,0	97,5			110,0	85,0			55,0
1	42,5	11,5	125,0	120,0	117,0	115,7			132,0	126,0			119,0
2	67,5	11,5	133,0	131,0	130,0	130,0			136,5	133,6			130,7
3	77,5	11,5	134,5	133,0	132,0	132,3			137,0	134,8			132,6
4	87,5	11,5	135,0	134,0	133,0	133,3			137,0	135,1			133,5
5	97,5	11,5	-	-	-	-			137,4	135,9			134,7
6	42,5	27,0	131,0	127,0	126,0	126,0			135,0	131,0			127,0
7	63,6	27,0	133,5	131,0	131,0	131,0			136,7	134,1			131,7
8	84,5	27,5	135,5	134,0	133,0	133,7			137,4	135,7			134,0
9	104,0	40,0	135,5	135,0	134,0	135,0			137,9	136,5			135,2
10	21,5	52,0	133,5	131,0	130,5	130,5			136,4	133,6			130,9
11	42,5	52,0	134,5	132,0	132,0	131,7			137,0	134,6			132,1

12	63,0	52,0	135,5	134,0	134,0	133,7			137,5	135,7			133,9
13	84,5	52,0	136,0	136,0	135,5	135,0			138,1	136,8			135,4
14	122,5	53,0	137,0	136,0	136,0	135,7			138,1	137,0			136,0
15	21,0	75,0	136,0	134,0	134,0	134,0			137,7	136,0			134,0
16	42,5	87,5	137,0	135,5	135,5	135,5			138,4	137,0			135,8
17	84,5	87,5	137,5	136,0	136,5	136,5			138,8	137,8			136,8
18	103,0	75,0	137,5	136,0	136,5	136,5			138,5	137,6			136,6
19	20,5	121,5	138,0	137,0	137,2	137,3			139,1	138,3			137,4
20	97,5	122,0	138,5	138,0	138,0	138,0			139,3	138,7			138,0
21	74,5	171,5	139,7	139,5	139,7	139,7			140,0	139,9			139,6
22	97,5	171,5	139,7	139,0	139,7	139,7			139,9	139,8			139,5
23	140,0	190,0	140,0	140,0	140,0	140,0			140,0	140,0			140,0

Tabelle XIV: Potenzialhöhen der Versuchsreihe 1, Versuch 1-7

Versuch Nr.		8		9		10		11		12			13			14		
Messpunkt Nr.	z (cm)	r (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	z (cm)	r (cm)	H (cm)	z (cm)	r (cm)	H (cm)	z (cm)	r (cm)	H (cm)	z (cm)	r (cm)	H (cm)
z1							25	10,0	80	25	10,0	110	40	11,5	130			
z2							25	0,0	90	25	0,0	120	35	11,5	115			
z3							35	11,5	90	35	11,5	120	32	11,5	100			
z4							40	11,5	123	40	11,5	134	30	11,5	75			
z5							30	0,0	40	30	0,0	85	25	0,0	115			
z6							32	11,5	70	32	11,5	100	25	11,5	105			
z7							0	139,0	140	0	190,0	140	0	140,0	140			
z8							0	190,0	140	30	60,0	139	30	0,0	65			
0	30,0	10,0	40,0	50,0	41,0	55,0			40,0			85,0			65,0			
1	42,5	11,5	118,9	122,5	122,0	127,7			128,0			135,3			134,0			
2	67,5	11,5	130,9	132,3	132,2	134,9			135,0			138,0			137,4			
3	77,5	11,5	132,7	133,8	133,8	135,6			137,7			138,1			137,6			
4	87,5	11,5	133,5	134,5	134,3	136,0			136,1			138,3			137,9			
5	97,5	11,5	133,9	135,2	135,0	136,2			136,8			138,6			138,1			
6	42,5	27,0	127,1	129,2	129,0	132,0			132,2			136,5			135,4			
7	63,6	27,0	131,6	133,0	132,8	135,0			135,2			137,9			137,2			
8	84,5	27,5	133,9	134,9	134,8	136,3			136,5			138,5			138,0			
9	104,0	40,0	134,8	136,0	135,9	137,0			137,0			138,8			138,4			
10	21,5	52,0	130,9	132,3	132,1	134,3			134,2			137,3			136,6			
11	42,5	52,0	132,1	133,4	133,2	135,2			135,2			138,0			137,2			
12	63,0	52,0	134,8	134,8	134,8	136,3			136,4			138,5			138,0			
13	84,5	52,0	135,9	136,0	135,9	137,2			137,8			138,9			138,8			
14	122,5	53,0	136,9	136,5	136,5	137,6			136,5			139,0			139,0			
15	21,0	75,0	134,0	135,1	135,0	136,5			137,7			138,4			138,0			
16	42,5	87,5	137,7	136,4	136,3	137,6			138,3			139,0			138,8			
17	84,5	87,5	136,5	137,1	137,1	138,1			138,2			139,3			139,1			
18	103,0	75,0	136,4	137,0	137,0	138,0			138,9			139,3			139,1			
19	20,5	121,5	137,2	137,8	137,8	138,9			140,1			139,7			139,5			
20	97,5	122,0	137,9	138,3	138,2	139,1			140,1			139,8			139,8			
21	74,5	171,5	139,5	138,7	139,6	140,2			140,2			140,5			140,4			
22	97,5	171,5	139,4	139,6	139,5	140,1			140,1			140,2			140,1			
23	140,0	190,0	140,0	140,0	140,0	140,0			140,0			140,0			140,0			

Tabelle XV: Potenzialhöhen der Versuchsreihe 1, Versuch 8-14

7.6 Aufbereitung der Messdaten (Versuchsreihe 1, 2 und 3)

Versuch Nr.	Sohlhöhe in cm	Absenkung in cm	Wsp _{Brunnen} in cm	Wsp _{ruhend} in cm	Förderrate in ml*min ⁻¹
	h_{sohle}	s	h	H	Q
1	30	55	85	140	60
2	30	75	65	140	80
3	30	85	55	140	90
4	30	100	40	140	86
5	30	30	110	140	35
6	30	55	85	140	59
7	30	85	55	140	83
8	30	100	40	140	82
9	30	90	50	140	75
10	30	100	40	140	78
11	30	85	55	140	60
12	30	100	40	140	58
13	30	55	85	140	28
14	30	75	65	140	37
15	30	30	110	140	245
16	30	55	85	140	305
17	30	75	65	140	280
18	30	100	40	140	520
19	30	55	85	140	370
20	30	75	65	140	340
21	30	85	55	140	470

22	30	75	65	140	400
----	----	----	----	-----	-----

Tabelle XVI: Messdaten von Versuchsreihe 1 und 2

Die Rohdaten wurden zur weiteren Verwendung für die Auswertung statistisch bereinigt. Der Umrechnungsfaktor zwischen der Einheit $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ für 15° und $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ für 360° betrug 4, E-07.

Versuchsreihe	1		2	
s [cm]	Q 360° $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	s [cm]	Q 360° $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
30	1,40E-05	30	9,80E-05	
55	2,40E-05	55	1,22E-04	
55	2,36E-05	55	1,48E-04	1,35E-04
55	1,12E-05	75	1,12E-04	
75	3,20E-05	75	1,36E-04	1,48E-04
75	1,48E-05	75	1,60E-04	
85	3,60E-05	85	1,88E-04	
85	3,32E-05	100	2,08E-04	
85	2,40E-05			
90	3,00E-05			
100	3,44E-05			
100	3,28E-05			
100	3,12E-05			
100	2,32E-05			

Tabelle XVII: Aufbereitung der Rohdaten

Versuchsreihe		1	2	1	2
h in m	s in m	Q für 15° in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Q für 15° in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Q für 360° in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Q für 360° in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

1,10	0,30	3,92E-07	4,08E-06	9,40E-06	9,80E-05
0,85	0,55	4,67E-07	5,63E-06	1,12E-05	1,35E-04
0,65	0,75	6,17E-07	6,67E-06	1,48E-05	1,60E-04
0,55	0,85	6,92E-07	7,83E-06	1,66E-05	1,88E-04
0,40	1,00	9,67E-07	8,67E-06	2,32E-05	2,08E-04

Tabelle XVIII: statistisch bereinigte Datengrundlage für die weitere Auswertung

	Versuch 1	Q_t in $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	570								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in s	0	15	30	48	67	88	113	141	176	228	382
	Versuch 2	Q_t in $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	540								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in s	0	16	33	53	76	99	126	158	198	258	453
	Versuch 3	Q_t in $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	550								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in s	0	16	33	52	72	95	122	152	190	249	432
	Versuch 4	Q_t in $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	430								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in s	0	18	38	61	86	113	145	181	229	301	514
	Versuch 5	Q_t in $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	420								
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
t' in s	0	18	39	63	89	117	149	188	236	312	521

Tabelle XIX: Versuchsergebnisse des Recovery-Tests

7.7 Randbedingungen für die verwendeten Brunnenformeln

Nachfolgend sind die Randbedingungen der verwendeten Brunnenformeln aufgelistet. Ändern sich die Randbedingungen zwischen den Formeln sind diese Veränderungen angeführt, alle übrigen Randbedingungen sind laut der davor angeführten Brunnenformel noch gültig.

Gespannter Aquifer

Die horizontale Erstreckung des Grundwasserkörpers um den Brunnen ist unendlich

Isotroper und homogener Bodenkörper im Brunneneinzugsgebiet

Die Aquifermächtigkeit im Brunneneinzugsgebiet ist konstant

Die Standrohrspiegelhöhen sind vor Beginn des Pumpversuchs auf gleicher Höhe

Förderrate ist stationär

Der Brunnen durchdringt den Aquifer vollkommen

Horizontaler Zustrom zum Brunnen

Horizontaler Wasserzutritt in den Brunnenkörper

Thiem

Förderrate ist stationär

Theis

Theis's recovery test

Förderrate ist stationär

ungespannter Aquifer

Horizontaler und vertikaler Zustrom zum Brunnen

Die Geschwindigkeit der Zuströmung ist proportional zum Tangens des hydraulischen Gradienten anstatt proportional zum Sinus (der Fall in der Realität)

Thiem-Deputit

max. Entnahmemenge

ungespannter Aquifer

Der Brunnen durchdringt den Aquifer vollkommen

Sichardt

Kozeny

Gespannter Aquifer

Vertikaler Wasserzutritt in den Brunnenkörper

Der Brunnen durchdringt den Aquifer unvollkommen

H. Lamb

Forchheimer

max. Aufstiegsgeschwindigkeit des Wasserspiegels im Brunnen

Vertikaler Wasserzutritt in den Brunnenkörper

Truelsen

Faustformel 1

Der Brunnen durchdringt den Aquifer unvollkommen

Vertikaler Wasserzutritt in den Brunnenkörper

Ungespannter Aquifer

Dudgeon und Cox

Leitner

Faustformel 2

ungespannter Aquifer

Förderrate ist instationär

Der Brunnen durchdringt den Aquifer unvollkommen

Horizontaler und vertikaler Zustrom zum Brunnen

Vertikaler Wasserzutritt in den Brunnenkörper

Methode der aufsteigenden Wassersäule (adaptiert)

Vertikaler und horizontaler Wasserzutritt in den Brunnenkörper

Bohrlochmethode nach Ernst

7.8 Auswertung der Brunnenformeln für die Versuchsreihen 1, 2 und 3

Versuchsreihe	1	2
s in m	Q für 360° in m^3s^{-1}	Q für 360° in m^3s^{-1}
0,3	9,40E-06	9,80E-05
0,55	1,12E-05	1,35E-04
0,75	1,48E-05	1,60E-04
0,85	1,66E-05	1,88E-04
1	2,32E-05	2,08E-04

inter/extrapolierte Werte

Versuchsreihe	1	2
	k in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	k in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Darcyversuch	7,0E-05	5,0E-03
d10 [mm]	0,06	0,6

$U=d60/d10$	3,3	1,7
<i>Hazen</i>	4,2E-05	4,2E-03
d80 [mm]	0,35	1,3
Modellgeometrie		
r in m	0,1	
H in m	1,4	
R in m	1,9	
A in m ²	0,0314	
h_{sohle} in m	0,3	

Tabelle XX: Datengrundlage für die Auswertung mittels ausgewählter Brunnenformeln

Formel nach	Leitner		Truelsen		Faustformel 2		Thiem-Deputit		Theis	
Vers.nr.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
s in m	k in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹	k _{max} in m*s ⁻¹	k _{max} in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹	k in m*s ⁻¹
0,3	5,E-05	5,E-03	5,E-03	6,E-02	2,E-04	2,E-03	2,E-05	2,E-04	2,E-06	9,E-06
0,55	4,E-05	6,E-03			1,E-04	2,E-03	1,E-05	1,E-04	3,E-06	1,E-05
0,75	5,E-05	6,E-03			1,E-04	1,E-03	1,E-05	1,E-04	6,E-06	2,E-05
0,85	5,E-05	7,E-03			8,E-05	9,E-04	1,E-05	2,E-04	1,E-05	4,E-05
1	8,E-05	6,E-03			6,E-05	5,E-04	2,E-05	2,E-04	1,E-05	9,E-05
	$k=(Q*32/(r^2*pi*exp^(s))^2$		$Q=A*vmax*f$		$k=Q/r^2/pi/(H/h)^2$		$k=Q/pi*ln(r2/r1)/(h2^2-h1^2)$		$k=Q/(s^4*pi*D*W(u))$	
			liefert max. Ergiebigkeit		$H= rGWsp$	1,4	r1 in m	0,1	$u=r^2*S/(4*k*D*t)$	
			$(d80+d90)/2*4$ [in mm für vmax		$h=GWspBrunnen$	=H-s	r2 in m	1,9	$W(u)=-0,5772-ln(u)+u-u^2/(2*2!)$	
			1,4	5,2			h2 in m	1,4	S=neff	0,2
			vmax in m*s ⁻¹ (Diagramm)				h1 in m	=h2-s in m	$D(i)=H-s(i)$	
			0,013	0,043					t=1Tag in s	3600
			f in mm =d80				da der Wasserspiegel an der Brunnensohle abrupt anspringt, sollte h1 vielleicht erhöht werden! z.B. h1=h2-s/2 Dadurch wird der k-wert erhöht (hier entsteht dadurch ein		k interativ	6,10E-07
			0,35	1,3					$s'=s-(s^2/2/D)$	6,05E-07

								geringerer Fehler)			8,30E-07	
			Q _{max} ist dadurch definiert, dass bei dieser Förderrate das Bodenmaterial unter der ersten Filterkornschicht nicht durch diese in den Brunnen gespült wird und der Brunnen versandet								1,00E-06	
												1,00E-06
												4,20E-06
												5,50E-06
												1,00E-05
												2,00E-05
											2,00E-05	

Tabelle XXI: Auswertung Brunnenformeln Teil 1

Thiem		Faustformel 1		Forchheimer		H. Lamb		Dudgeon u. Cox		Sichardt		Kozeny	
k in m*s ⁻¹													
1,E-05	1,E-04	3,E-05	3,E-04	5,E-05	5,E-04	8,E-05	8,E-04	3,E-05	3,E-04	2,E-07	2,E-05	1,E-05	1,E-04
8,E-06	1,E-04	2,E-05	2,E-04	3,E-05	4,E-04	5,E-05	6,E-04	3,E-05	3,E-04	2,E-07	3,E-05	2,E-05	2,E-04
9,E-06	1,E-04	2,E-05	2,E-04	3,E-05	3,E-04	5,E-05	5,E-04	3,E-05	3,E-04	4,E-07	5,E-05	2,E-05	2,E-04
9,E-06	1,E-04	2,E-05	2,E-04	3,E-05	4,E-04	5,E-05	6,E-04	3,E-05	3,E-04	5,E-07	7,E-05	2,E-05	3,E-04
1,E-05	1,E-04	2,E-05	2,E-04	4,E-05	3,E-04	6,E-05	5,E-04	3,E-05	3,E-04	1,E-06	8,E-05	3,E-05	3,E-04

$k=Q/(2\pi D(h_2-h_1))\ln(r_2/r_1)$		$k=Q/(H-h_{\text{sohle}})/s$		$k=Q/(2\pi r_0(H-h))$		$k=Q/(4r_0(H-h))$		$k=Q/h_0^2/f$		$k=(Q\cdot 30)/(2\pi r\pi H)^2$		$K=Q/(2\pi r\pi H)$	
$D=h_2-s/2$				$r_0=r$		$r_0=r$		$r_0=R$					
r_1 in m	0,1			$h=H-s$		$h=H-s$		$h_0=H$					
r_2 in m	1,9			$H=H-h_{\text{sohle}}$		$H=H-h_{\text{sohle}}$		$rw=r$					
h_2 in m	1,4							$hw=H-s$					
in m	$=h_2-s$ in m							$lb=h_{\text{sohle}}$					
								r_0/h_0	1,35714286				
								h_0/rw	14				
								hw/h_0	0,78571429				
									0,60714286				
									0,46428571				
									0,39285714				
									0,28571429				
								lb/h_0	0,21428571				
								f= Tabellenwert					
									0,16				

									0,2				
									0,25				
									0,28				
									0,38				
									0,38				

Tabelle XXII: Auswertung Brunnenformeln Teil 2

k-Wert Bestimmung durch "Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel"													
ha=konst.	0	angenommen, da sonst letzter H=0 nicht ausgewertet werden kann											
L filter	0,08												
L horizontal	1,8												
ks=L/(ti+1-ti)*ln((hi-ha)/(hi+1-ha))													
ks=(si-1-si)/(ti-ti-1)		Verwendete Formell!											
für ungespannte Aquifere können bei der Aufspiegelung nur jene werte herangezogen werden die unmittelbar vor dem Erreichen des Ausgangswasserspiegels gemessen werden, da die davor liegenden werte um die Speicherauffüllung um den Brunnen (Absenktrichter) verfälscht sind. es ergibt sich bei einer semi-log Darstellung (log s, t) eine Gerade, die den Durchlässigkeitsbeiwert repräsentiert.													
	Versuch 1	Q(t) in ml*min ⁻¹	570										
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01		
t' in s	0	15	30	48	67	88	113	141	176	228	382		

t/t' in s		481	241	151	108	83	65	52	42	33	20		
ksi in m*s ⁻¹		6,67E-03	6,67E-03	5,56E-03	5,26E-03	4,76E-03	4,00E-03	3,57E-03	2,86E-03	1,92E-03	5,84E-04	4,19E-03	
	Versuch 2	Q(t) in ml*min ⁻¹	540										
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01		
t' in s	0	16	33	53	76	99	126	158	198	258	453		
t/t' in s		451	219	137	96	74	58	47	37	29	17		
ksi in m*s ⁻¹		6,25E-03	5,56E-03	4,35E-03	3,57E-03	3,13E-03	2,63E-03	2,22E-03	1,75E-03	1,22E-03	4,00E-04	3,11E-03	
	Versuch 3	Q(t) in ml*min ⁻¹	550										
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01		
t' in s	0	16	33	52	72	95	122	152	190	249	432		
t/t' in s		451	219	139	101	77	60	48	39	30	18		
ksi in m*s ⁻¹		6,25E-03	5,56E-03	4,55E-03	4,17E-03	3,57E-03	2,94E-03	2,56E-03	2,04E-03	1,37E-03	4,41E-04	3,34E-03	
	Versuch 4	Q(t) in ml*min ⁻¹	430										
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01		
t' in s	0	18	38	61	86	113	145	181	229	301	514		
t/t' in s		401	190	119	85	65	51	41	32	25	15		
ksi in m*s ⁻¹		5,56E-03	4,35E-03	3,23E-03	2,63E-03	2,17E-03	1,75E-03	1,47E-03	1,14E-03	8,00E-04	3,15E-04	2,34E-03	

	Versuch 5	Q(t) in ml*min ⁻¹	420									
s' in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01	
t' in s	0	18	39	63	89	117	149	188	236	312	521	
t/t' in s		401	186	115	82	63	49	39	32	24	15	
ksi in m*s ⁻¹		5,56E-03	4,17E-03	3,03E-03	2,44E-03	2,00E-03	1,64E-03	1,33E-03	1,05E-03	7,35E-04	3,07E-04	2,23E-03
											ksmittel	3,04E-03
Recovery test nach Theis												
vereinfacht, da die Annahme getroffen wurde, dass der Speicherkoeffizient für die Absenkung und Aufspiegelung gleich ist.												
s'=2,3*Q/(4*pi*k*D)*log(t/t')					t=ca. 2Std	7200	in s.					
	Q0 in m ³ *s ⁻¹	s'1 in m	s'2 in m	s'3 in m	D in m	t' 1 in s	t'2 in s	t'3 in s	k1 in m*s ⁻¹	k2 in m*s ⁻¹	k3 in m*s ⁻¹	kmittel
Versuch1	2,28E-04	0,2	0,1	0,01	1,1	176	228	382	3,08E-04	5,74E-04	4,88E-03	1,92E-03
Versuch2	2,16E-04	0,2	0,1	0,01	1,1	198	258	453	2,83E-04	5,25E-04	4,37E-03	1,73E-03
Versuch3	2,20E-04	0,2	0,1	0,01	1,1	190	249	432	2,91E-04	5,40E-04	4,52E-03	1,79E-03
Versuch4	1,72E-04	0,2	0,1	0,01	1,1	229	301	514	2,16E-04	4,00E-04	3,34E-03	1,32E-03

Versuch5	1,68E-04	0,2	0,1	0,01	1,1	236	312	521	2,09E-04	3,86E-04	3,24E-03	1,28E-03	
				Ergebnis ist sehr sensibel auf s!!!									
Bohrlochmethode nach Ernst													
$k_s = 4,17 \cdot r^2 / ((h_1 + h_2) / 2 \cdot (H + 10 \cdot r) \cdot (2 - (h_1 + h_2) / 2H)) \cdot \Delta h / \Delta t$													
s < 0,5*H		nur Werte bis 0,25*h0 verwenden											
r in m	0,1												
H in m	1,1												
s in m	0,3												
h0 in m	1												
Versuch1													
hi in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3					
ti in s	0	15	30	48	67	88	113	141					
k _s in m*s ⁻¹		1,2E-04	1,3E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,2E-04	1,2E-04				

Versuch2													
hi in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3					
ti in s	0	16	33	53	76	99	126	158					
k_s in $m*s^{-1}$		1,1E-04	1,1E-04	1,0E-04	9,4E-05	1,0E-04	1,0E-04	1,1E-04	1,0E-04				
Versuch3													
hi in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3					
ti in s	0	16	33	52	72	95	122	152					
k_s in $m*s^{-1}$		1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,1E-04	1,0E-04	1,0E-04	1,1E-04	1,1E-04				
Versuch4													
hi in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3					
ti in s	0	18	38	61	86	113	145	181					
k_s in $m*s^{-1}$		1,0E-04	9,5E-05	8,7E-05	8,7E-05	8,9E-05	8,7E-05	9,4E-05	9,2E-05				
Versuch5													
hi in m	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3					
ti in s	0	18	39	63	89	117	149	188					

k_s in $m \cdot s^{-1}$		1,0E-04	9,1E-05	8,4E-05	8,3E-05	8,6E-05	8,7E-05	8,6E-05	8,8E-05				
---------------------------	--	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--	--	--	--

Tabelle XXIII: Auswertung Brunnenformeln Teil 3

Formel nach	Methode d. aufst. Wassersäule	Recovery-Test nach Theis	Bohrlochmethode nach Ernst
	k in m*s-1	k in m*s-1	k in m*s-1
Versuch 1	4,E-03	2,E-03	1,E-04
Versuch 2	3,E-03	1,E-03	1,E-04
Versuch 3	3,E-03	1,E-03	1,E-04
Versuch 4	2,E-03	1,E-03	9,E-05
Versuch 5	2,E-03	1,E-03	9,E-05
	$k_s = (s_i - 1 - s_i) / (t_i - t_i - 1)$	$s' = 2,3 * Q / (4 * \pi * k * D) * \log(t/t')$	$k_s = 4,17 * r^2 / ((h_1 + h_2) / 2 * (H + 10 * r) * (2 - (h_1 + h_2) / 2 / H)) * \Delta h / \Delta t$

Tabelle XXIV: Ergebnisse der instationären Pumpversuchsauswertung (Recovery Tests)