



Bericht Nr. 1027

Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbewertes von Breckorn Basalt

Braunschweig, September 2012



Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes von Breckorn Basalt

Auftraggeber: upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH
Breite Straße 30
39576 Stendal

Bearbeitung: Dr.-Ing. Arjan Tuijnder
Dipl.-Ing. Ralph Eikenberg

Braunschweig, September 2012

Dr.-Ing. Arjan Tuijnder

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
1.1.	Versuchsaufbau	4
1.2.	Vorgehensweise	5
2.	Messergebnisse.....	6
3.	Berechnung der kf-Werte	7
3.1.	Grundlagen.....	7
3.2.	Lineare Methode zur Berechnung der kf-Werte	8
3.3.	Nichtlineare Methode zur Berechnung der kf-Werte.....	9
4.	Ergebnisse	10
4.1.	Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten	11
5.	Fazit.....	13
6.	Literatur.....	13

1 Einleitung

Die upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH beauftragte das Leichtweiß-Institut für Wasserbau mit der Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte k_f von Brechkorn Basalt in den Kornfraktionen 8-16 mm, 32-64 mm sowie einer Mischung aus beiden Fraktionen.

1.1 Versuchsaufbau

Um die Durchlässigkeit des Materials zu messen, wurde in einer Versuchsrinne ein etwa 4 Meter langer Kieskörper eingebracht und in diesem ein hydraulisches Gefälle aufgebracht. Die Breite des Kieskörpers betrug 0,3 m; der maximal mögliche Wasserstand, der auf dem Kies aufgebracht werden konnte betrug 0,5 m. Die Durchlässigkeit wurde aus den Wasserständen im Kieskörper berechnet, die in Abständen von 1 m gemessen wurden. Dieser Versuchsaufbau ist aus den folgenden Abbildungen (Abb. 1 – 5) ersichtlich. Die Metallstreifen (Abb. 1) bezeichnen die Messquerschnitte. An diesen Stellen ragen dünne Druckröhren einige Zentimeter in den Kieskörper (vgl. Abb. 2). Diese Druckröhren waren über Schläuche mit einer Messharfe verbunden, an der die Wasserstände mit einer Genauigkeit von weniger als einem Millimeter abgelesen werden konnten (vgl. Abb. 3).



Abbildung 1: Seitliche Ansicht des Versuchsaufbaus. Die Fließrichtung ist von rechts nach links. Die Abstände zwischen den Messquerschnitten (Metallstreifen) betragen jeweils etwa 1 m.

Der Wasserzufluss in die Rinne erfolgt aus dem Leitungssystem der Versuchshalle. Über Pumpen wird das Wasser aus einem Tiefbehälter in den 10 m über dem Hallenboden gelegenen Hochbehälter befördert und von dort verteilt. So ist während der Versuche immer eine konstante Druckhöhe von 10 m garantiert. Die Rinne verfügt über zwei Zuleitungen mit unterschiedlichen Querschnittsgrößen. Für diese Versuche wurde die Zuleitung mit dem geringeren Durchmesser verwendet, da mit ihr die sehr geringen Durchflussmengen besser eingestellt werden konnten. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen den Bypass der Zuleitung mit dem geringeren Durchmesser mit IDM für kleine Durchflussmengen.



Abbildung 2 (links) & 3 (rechts), Detailansicht der Druckmesseinrichtung und der Pegelharfe, die eine präzise Messung und Ablesung der Wasserstände erlaubte.



Abbildung 4 (links) & 5 (rechts), Wasserzufuhr mit Bypass für geringe Durchflussmengen und IDM für die Durchflussmessung.

1.2 Vorgehensweise

Als Vorbereitung für die Durchführung einer Versuchsreihe wurde zuerst das Kiesmaterial über die erforderliche Länge in die Rinne eingebracht und die Pegel angebracht. Die Positionen der Pegel wurde abhängig von der Position des ersten Pegels am oberstromigen Ende gewählt. Für jede Messung wurde das Wehr zur Festlegung des unterstromigen Wasserstandes und der Abfluss zur Festlegung des oberstromigen Wasserstandes eingesetzt. Nachdem die Randbedingungen eingestellt waren, wurde ausreichend lange gewartet, bis sich der Wasserstand ausgeglichen hatte. Dabei stellte sich heraus, dass eine halbe Stunde ausreichte. Die Ablesung der Messwerte von der Pegelharve erfolgte somit immer erst nach Verstreichen der 30 Minuten.

2 Messergebnisse

Die Messergebnisse sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die erste Versuchsreihe (Versuch 1) beinhaltete mehr Versuche als die Übrigen. Dies hatte den Grund, da sichergestellt sein musste, dass die Messgenauigkeit ausreichend war, um den Einfluss verschiedener Wehrstellungen erfassen zu können und um zu bestimmen, welches die kleinstmögliche Anpassungszeit war. Die Reihen der Tabelle 1 geben die Einzelmessungen wieder; diese sind mit einer Nummer in der ersten Spalte gekennzeichnet. Der Durchfluss (Q) in Liter pro Sekunde (l/s) aus jeder Einzelmessung ist der zweiten Spalte zu entnehmen. Die gemessenen Wasserstände sind in Zentimetern (cm) relativ zum Rinnenboden gemessen. Sie können als Wassertiefe innerhalb des Kieskörpers interpretiert werden. Die Messpunkte 1 und 7 sind die ober- und unterstromige Randbedingung und in der Abb. 6 grün markiert. Die Messpunkte 2 bis 6 befanden sich innerhalb des Kieskörpers. Die Nummerierung war aufsteigend mit der Fließrichtung im Kieskörper. Die Abstände zwischen den Messpunkten sind in der Reihe dx in Zentimetern angegeben.

Tabelle 1 Ergebnisse der Messungen

Versuch 1 - Brechkorn 8/16									
Punkt #			1	2	3	4	5	6	7
Mess. #	Q [l/s]	dx [cm]	0 97 91 133.8 83						
1	1.8	Pegel [cm]	51.24	49.95	46.51	40.93	34.97	25.17	12.63
2	1.9		52.5	51.45	47.99	41.68	35.94	25.67	12.7
3	1.7		50.05	48.56	45.15	39.83	34.03	24.64	12.57
4	1.4		45.52	43.92	40.96	36.36	31.37	23.16	14.2
5	0.86		36.23	34.83	32.73	29.46	25.91	20.08	15.02
6	0.86		36.2	34.82	32.73	29.49	25.9	20.08	15.02
7	0.86		36.39	35.02	32.92	29.75	26.25	20.8	17.43
8	0.86		37.36	36.09	34.14	31.19	28.14	23.95	23.39
9	1.18		42.64	41.15	38.66	34.83	30.83	25.05	22.72

Versuch 2 - Brechkorn 32/64									
Punkt #			1	2	3	4	5	6	7
Mess. #	Q [l/s]	dx [cm]	0 100 100 100 100						
1	3.36	Pegel [cm]	48.32	47.18	44.29	41.07	35.07	27.24	21.3
2	3.36		48.15	46.98	44.07	40.8	35.33	26.4	17.98
3	2.22		39.31	38.26	36.16	33.77	29.64	23.12	17.35
4	3.66		50.1	48.98	45.9	42.42	36.62	27.05	16.29
5	0.62		24.19	23.7	22.93	22.12	20.7	19.04	18.25

Versuch 3 - Brechkorngemisch 8/16 und 32/64									
Punkt #			1	2	3	4	5	6	7
Mess. #	Q [l/s]	dx [cm]	0 100 100 99 101						
1	1.04	Pegel [cm]	39.74	39.02	36.54	34.38	28.6	21.05	15.01
2	1.58		48.9	48.13	44.43	40.57	33.8	21.35	15.47
3	0.8		35.33	34.7	32.43	30.1	27.28	21.12	15.5



Abbildung 6 quadratischer Verlauf des Wasserspiegels (rot) zwischen den Randbedingungen am ober- und unterstromigen Ende (grün)

3 Berechnung der k_f -Werte

Die k_f -Werte wurden aus den Wasserspiegelmessungen mittels einer linearen und einer nicht-linearen Methode berechnet. Die Projektanfrage von upi nahm an, dass die Druckhöhe auf 2 Metern Länge innerhalb des Kieskörpers linear abnimmt. Wegen der Unsicherheit bezüglich der Fehlergröße aus dieser Annahme wurde die Druckhöhe außerdem mit Lösung der Darcy-Differenzialgleichung in Längsrichtung der Rinne berechnet. Dies führt zu einem quadratischen Längsschnitt. Dieser ist auch in den Rinnen-Experimenten sichtbar. Das Wasserspiegelprofil wird in Abb. 6 gezeigt. Diese nicht-lineare Methode wurde auf zweierlei Weise angewendet: zum einen wurde für jeden Messpunkt im Kieskörper ein k_f -Wert berechnet, zum anderen nur für die Messpunkte 2 bis 5, wobei der Messpunkt 6 ausgelassen wurde. Falls die Messfehler nur gering sind und das mathematische Modell den Prozess korrekt wiedergibt, sollten die Ergebnisse identisch sein.

3.1 Grundlagen

Ungeachtet der gewählten Methode wurden die folgenden Gleichungen verwendet:

$$Q = vA \quad (1)$$

$$dQ/dx = 0 \quad (2)$$

$$v = -k_f I \quad (3)$$

Q ist der Durchfluss, v die Darcy-Geschwindigkeit, A der Durchflussquerschnitt normal zur Fließrichtung, I der hydraulische Gradient, k_f der Durchlässigkeitsbeiwert, x bezeichnet die Rinnenachse in Längsrichtung. Die Darcy-Gleichung ist nur gültig für laminare Grundwasserströmungen. Die Porengeschwindigkeit bezieht sich dabei auf die Darcy-Geschwindigkeit (v):

$$v_p = v/p \quad (4)$$

mit p als Porosität des Materials.

3.2 Lineare Methode zur Berechnung der k_f -Werte

(Methode entsprechend "Aufbau-Wasserdurchlässigkeitsversuch am Brechkorn.pdf", Email von Herrn Nico Gose, upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH, 04.07.2012) Die Annahme ist, dass der Wasserspiegel linear über die Länge des Messvolumens abnimmt. Das Energiegefälle ist dabei das durchschnittliche Gefälle im Messvolumen und der durchflossene Querschnitt ist ebenso der mittlere Querschnitt über das Messvolumen. Gefälle und Querschnitt sind definiert als:

$$I = (h_{p2} - h_{p1}) / L \quad (5)$$

$$A = b(h_{p2} + h_{p1}) / 2 \quad (6)$$

Die Symbole sind in der Abb. 7 definiert.

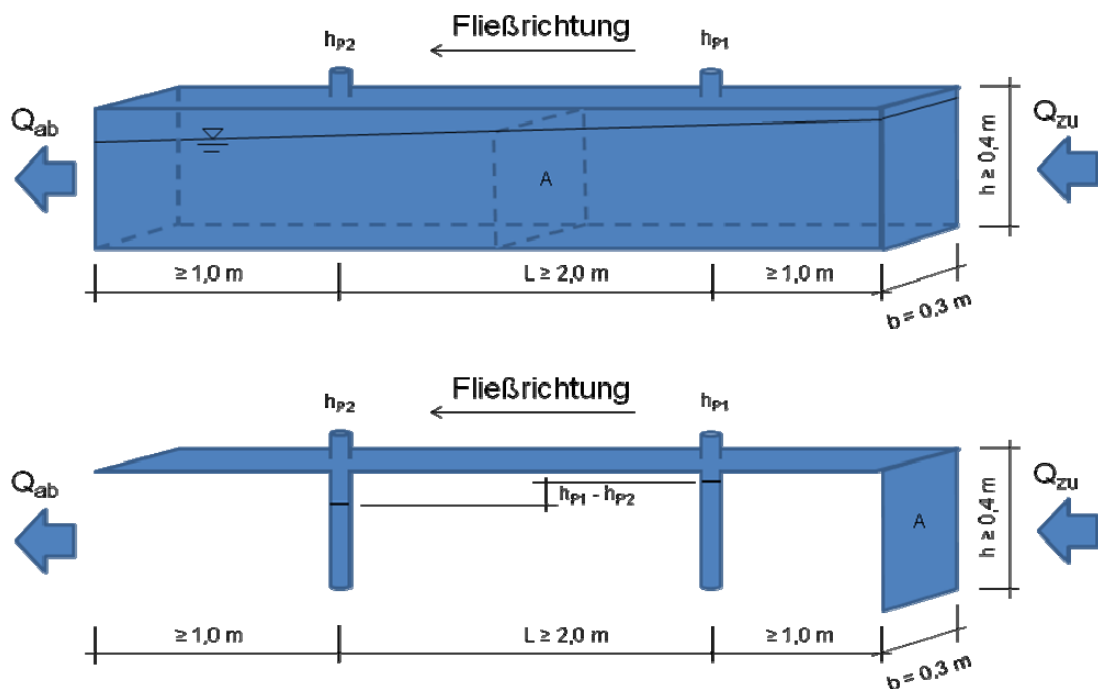


Abbildung 7 Definitionsskizze des Versuchsaufbaus für die lineare Methode zur Berechnung von k_f

Aus den Gleichungen 1 bis 6 folgt, dass der k_f -Wert wie folgt berechnet werden kann:

$$k_f = \frac{Q}{\left(\frac{b(h_{p1} - h_{p2})(h_{p1} + h_{p2})}{2L} \right)} \quad (7)$$

Die Gleichung wurde anhand der Messpunkte 3 und 5 aus der Ergebnistabelle angewendet. Dies ergibt die in Abb. 7 dargestellte Situation mit einer Messlänge von 2 m und jeweils 1 m vor und hinter den Messquerschnitten. Die berechneten Werte sind der Tabelle 2 zu entnehmen und in den Abbildungen im Abschnitt „Ergebnisse“ dargestellt.

3.3 Nichtlineare Methode zur Berechnung der k_f -Werte

Anstatt einen linearen Verlauf des Wasserspiegelprofils über den 2 m langen Messbereich zwischen den Punkten 3 und 5 anzunehmen, ist es in diesem Fall auch möglich, einen gekrümmten Wasserspiegelverlauf numerisch zu berechnen. Grundsätzlich werden dieselben Gleichungen wie im oben beschriebenen Verfahren angewendet (Gl. 1 bis 6). Allerdings betragen die Abstände dx zwischen den Messquerschnitten nur noch 1 cm. Der Referenzpunkt für die Berechnung des Wasserspiegels ist der erste Punkt im Kieskörper (Messpunkt 2).

Die Darcy-Gleichung (Gl. 3) und die Kontinuitätsgleichung (Gl. 1) können wie folgt kombiniert werden:

$$\left. \begin{array}{l} v = -k_f \frac{dh}{dx} \\ Q = bhv \end{array} \right\} \rightarrow Q = -bhk_f \frac{dh}{dx} = -bk_f \frac{1}{2} \frac{dh^2}{dx} \quad (8)$$

Dieser Ausdruck kann umgeschrieben werden zu:

$$\frac{dh^2}{dx} = \frac{2Q}{k_f b} = C \quad (9)$$

Q , k_f sowie die Rinnenbreite b sind konstant. Deshalb sinkt im Falle eines ungesättigten Grundwasserleiters das Quadrat der Wassertiefe linear ab. Die Wassertiefen in jedem Messpunkt können leicht über die Wurzel von h^2 berechnet werden.

Der k_f -Wert kann von 2 Messpunkten aus ermittelt werden. Allerdings befinden sich 5 Messpunkte im Kieskörper, sodass man ein überstimmtes Gleichungssystem erhält. Dies bedeutet, dass man mehrere k_f -Werte erhalten kann. Um festzustellen, welcher k_f -Wert am besten zu den Messergebnissen passt, wurden die Wasserstände bei einer Reihe verschiedener k_f -Werte mit Unterschieden von 0,01 m/s berechnet. Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurde angewendet um das beste Ergebnis zu ermitteln. Es ist also der k_f -Wert gewählt worden, der den niedrigsten Wert für die Abstände zwischen der berechneten Tiefe (h_p) und der gemessenen Tiefe (h_m) liefert. Die Summe der Quadrate ist definiert als:

$$SS = \sum (h_m - h_p)^2 \quad (10)$$

4 Ergebnisse

Die Durchlässigkeit wurde aus den gemessenen Wasserständen mit Hilfe der drei oben beschriebenen Methoden berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Ebenso ist der durchschnittliche hydraulische Gradient aufgeführt. Die Berechnungen erfolgten zwischen den Messpunkten 2 und 6.

Tabelle 2 Ergebnisse der k_f -Werte (in m/s) für die drei verwendeten Methoden. Die "nlin. Alle"-Spalte zeigt die Ergebnisse der nicht-linearen Methode für alle Messungen im Kieskörper. Die "nlin. Teil"-Spalte zeigt die Ergebnisse der nicht-linearen Methode für die Messpunkte 2 bis 5. Die "linear"-Spalte zeigt die Ergebnisse für die lineare Methode.

Mess #	nlin. Alle	nlin. Teil	Linear	I
1	0.33	0.32	0.37	0.061
2	0.32	0.31	0.36	0.064
3	0.33	0.32	0.38	0.059
4	0.36	0.34	0.40	0.051
5	0.41	0.39	0.47	0.037
6	0.41	0.39	0.47	0.036
7	0.41	0.40	0.47	0.035
8	0.44	0.43	0.49	0.030
9	0.40	0.39	0.44	0.040

Mess #	nlin. Alle	nlin. Teil	Linear	I
1	0.74	0.70	0.80	0.050
2	0.72	0.68	0.84	0.051
3	0.83	0.77	0.96	0.038
4	0.70	0.66	0.82	0.055
5	1.35	1.27	1.46	0.012

Mess #	nlin. Alle	nlin. Teil	Linear	I
1	0.34	0.31	0.37	0.045
2	0.28	0.27	0.33	0.067
3	0.39	0.37	0.50	0.034

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Berechnungen der k_f -Werte. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse für das feine Brechkorn (8-16 mm); Abb. 9 für das grobe Brechkorn (32-64 mm) und Abb. 10 für die Mischung beider Fraktionen (8-16 & 32-64 mm). Die grünen Punkte zeigen die lineare Approximation wie von upi vorgeschlagen, die schwarzen und blauen Punkte die nicht-linearen Methoden. Der Kreis bezeichnet die Berechnung für die gesamte Palette, der diamantförmige Punkt die Ergebnisse ohne den letzten Messpunkt. Es ist ersichtlich, dass die lineare Methode systematisch höhere Werte liefert. Der Unterschied zu den Ergebnissen der nicht-linearen Methode beträgt maximal 0,15 m/s, aber durchschnittlich 0,08 m/s. Für k_f -Werte sind dies große Unterschiede, da typische k_f -Werte allein schon kleiner sind, als die Unterschiede in diesem Fall. Die Ergebnisse der zwei nicht-linearen Methoden liegen dichter beisammen mit einem durchschnittlichen Unterschied von 0,03 m/s.

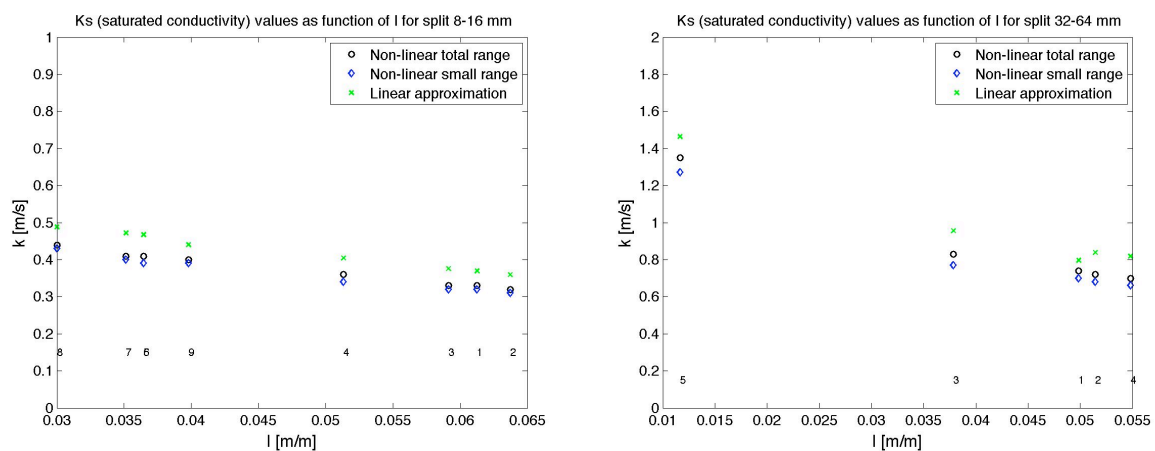


Abbildung 8 (links) & 9 (rechts) Berechnete k_f -Werte für den feinen und das grobe Brechkorn

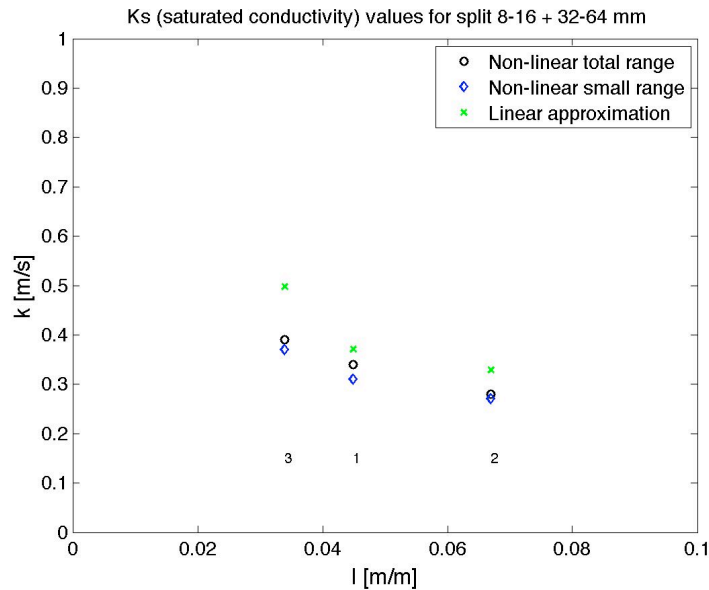


Abbildung 10 Berechnete k_f -Werte für die Mischung der feinen und groben Fraktion.

Der k_f -Wert beträgt für das feine Brechkorn 0,4 m/s und 0,8 m/s für das grobe Brechkorn. Die Mischung beider Fraktionen hat mit etwa 0,3 m/s eine etwas geringere Durchlässigkeit als das feine Brechkorn. Der Grund für diese Abnahme ist der geringere Porenanteil einer Kornmischung im Vergleich zum Porenanteil bei einer Fraktion (z. B. Yu, Zou and Standish, 1996). Somit verringert sich die Durchlässigkeit mit geringer werdendem Porenanteil. Es ist ersichtlich, dass die Durchlässigkeit für alle Versuche deutlich größer als 0,1 m/s ist. Allerdings sinkt die Durchlässigkeit mit zunehmendem hydraulischem Gradienten (I). Der hydraulische Gradient, wie auf der x-Achse der Abb. 8-10 gezeigt, berechnet sich aus dem Pegelunterschied über die 4 m des Kieskörpers. Diese Abhängigkeit des k_f -Wertes von I wird im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

4.1 Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten

Grundwasserströmungen sind grundsätzlich laminar, was bedeutet, dass das Wasser im Porenraum turbulenzfrei in parallelen, geordneten Stromlinien fließt. In einer Kiesschicht sind die Poren relativ groß, sodass das Wasser entsprechend schneller fließt. Deshalb entwickeln sich Turbulenzen und damit zusätzliche Energieverluste. Infolge dessen muss der hydraulische Gradient für einen bestimmten Durchfluss größer sein, als nach Grundlage des Darcy-Gesetzes erwartet. Umgekehrt bedeutet dies: für einen gegebenen hydraulischen Gradienten ist der Durchfluss geringer als nach Darcy erwartet. Dies kann anhand der Messungen gezeigt werden, wenn die Durchlässigkeit über den hydraulischen Gradienten aufgetragen wird (Abb. 8-10); die Durchlässigkeit nimmt mit steigendem hydraulischem Gefälle ab.

Die vorliegenden Experimente wurden entwickelt, um Grundwasserströmungen unabhängig vom Gefälle zu messen. Aufgrund der Tiefe der Rinne ist die Möglichkeit das Gefälle zu verändern begrenzt. Dies macht es unmöglich, die Durchlässigkeit für große Gradienten zuverlässig zu messen. Um den Effekt des steigenden Gefälles abzuschätzen, wurden entsprechende Werte in der Literatur gesucht. In Mulqueen (2005) wurde eine Reihe von Versuchen gefunden, die für das vorliegende Problem relevant sind. Ein etwas feineres Brechkorn ($D = 9-19$ mm) wurde für eine große Bandbreite hydraulischer Gradienten getestet. In der nachfolgenden Abb. 11 sind die Ergebnisse von Mulqueen (2005) mit den vorliegenden Messergebnissen verglichen.

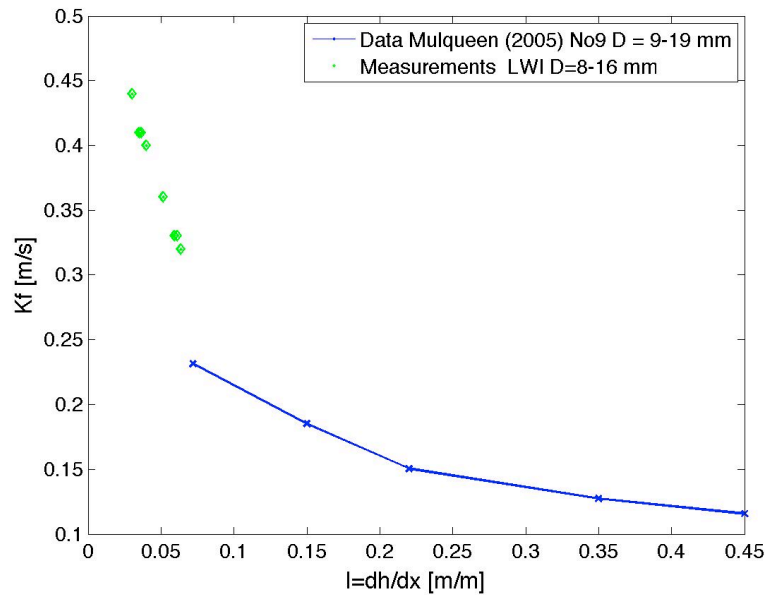


Abbildung 11 Vergleich der Messergebnisse mit denen von Mulqueen (2005) für das feinere Brechkorn

Abbildung 11 zeigt einen weiteren Rückgang der Durchlässigkeit infolge der steigenden turbulenten Energieverluste. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass es sehr gut möglich ist, dass die Durchlässigkeit der 8-16 mm-Fraktion mit steigendem hydraulischen Gradienten bis auf etwa 0,1 m/s abnimmt.

Das größte Brechkorn, das von Mulqueen (2005) getestet wurde, hatte eine Korngröße von 25 mm. Dies ist deutlich kleiner als die 32-64 mm-Fraktion aus den für die vorliegende Fragestellung durchgeführten Versuchen. Die folgende Abbildung 12 zeigt wiederum den Vergleich. Die von Mulqueen gemessene Durchlässigkeit ist verglichen mit der vorliegenden relativ hoch. Auch zeigt die Abb. 12 wieder die Abnahme der Durchlässigkeit mit steigendem hydraulischen Gradienten.

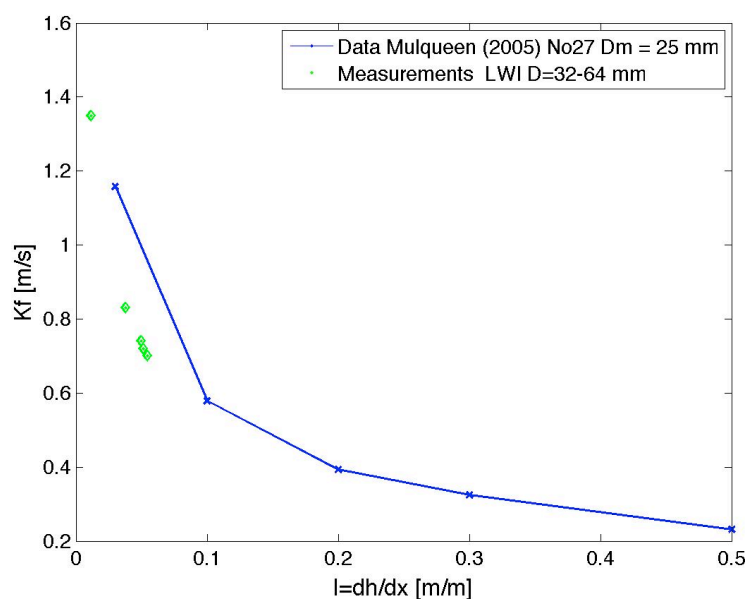


Abbildung 12 Vergleich der Messungen mit denen von Mulqueen (2005) für das grobe Brechkorn.

5 Fazit

Alle gemessenen Durchlässigkeiten liegen deutlich über 0,1 m/s. Bei steilem hydraulischem Gefälle sinkt die Durchlässigkeit deutlich und erreicht schließlich 0,1 m/s. In Abhängigkeit der erwarteten hydraulischen Gradienten kann zwischen den Fraktionen 8 – 16 mm und 32 – 64 mm gewählt werden. Die Mischung beider Fraktionen weist die geringste Durchflusskapazität auf.

Literatur

J. Mulqueen (2005) The flow of water through gravels, *Irish Journal of Agricultural and Food Research* Vol. 44(1)

A. B. Yu, R. P. Zou and N. Standish (1996) Modifying the Linear Packing Model for Predicting the Porosity of Nonspherical Particle Mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996, 35, 3730-3741